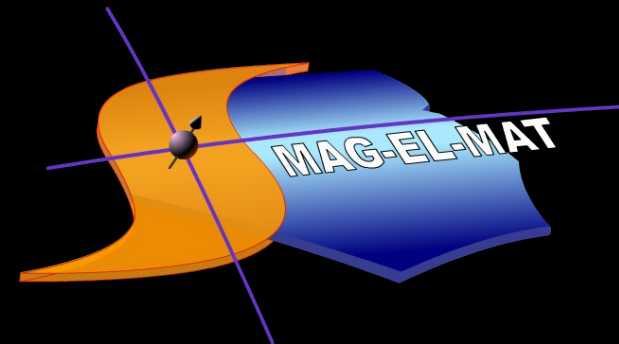


Własności magnetyczne i
magnetoopór
warstw wielokrotnych
NiFe/Au/Co/Au

M. Urbaniak, F. Stobiecki, B. Szymański
IFM PAN

08.05.2007 Będlewo

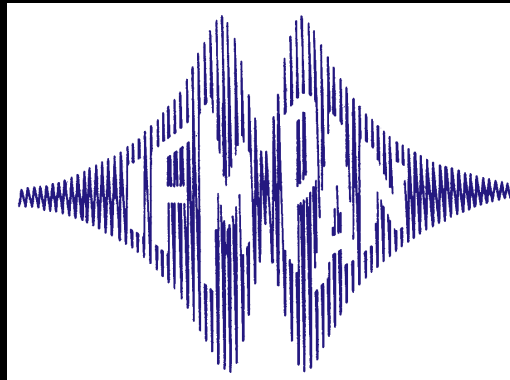


Własności magnetyczne i
magnetoopór
warstw wielokrotnych
NiFe/Au/Co/Au

Współpraca:



UNIKASSEL
VERSITÄT



IFM PAN Poznań

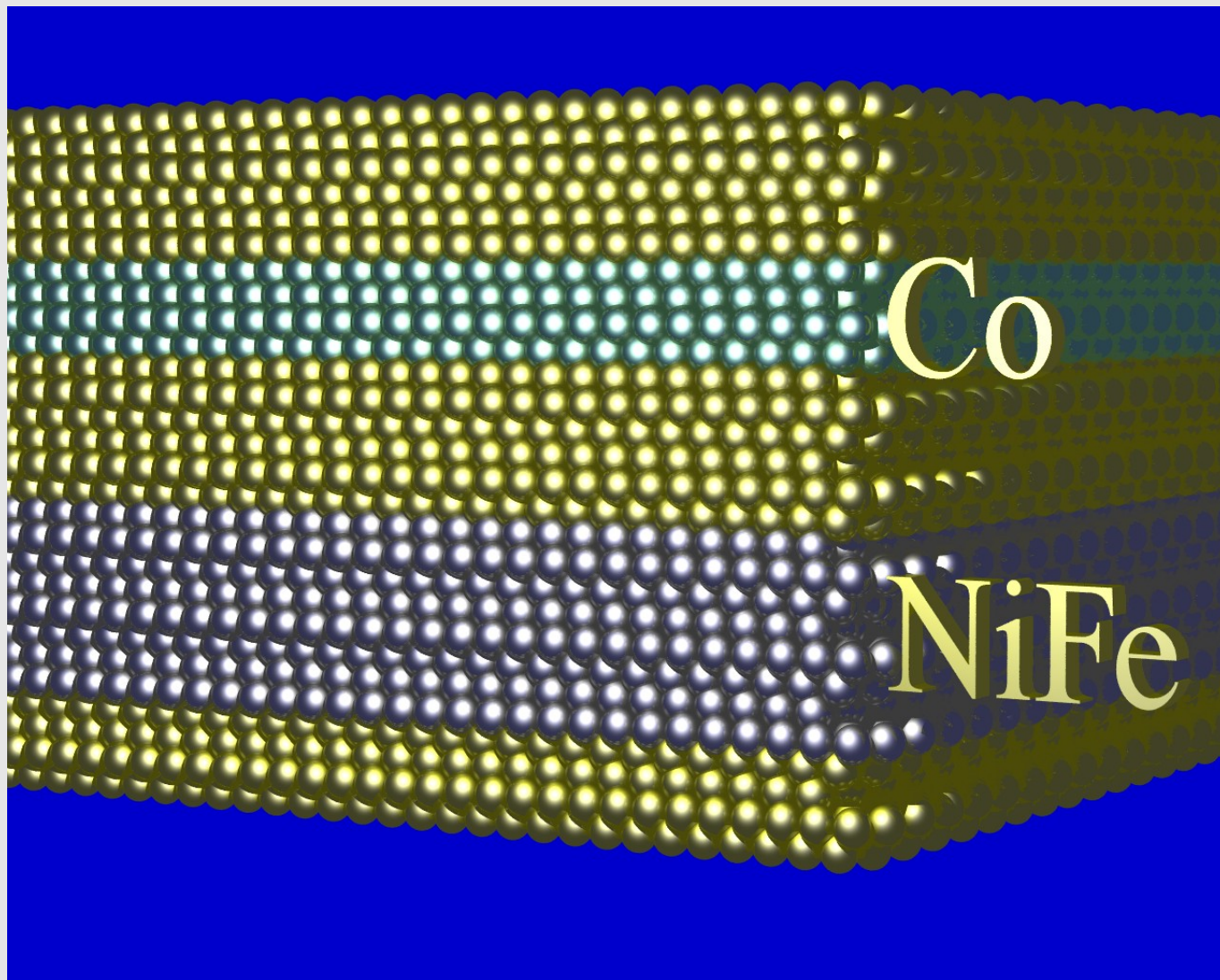


Uniwersytet w Białymstoku

Własności magnetyczne i magnetoopór warstw wielokrotnych NiFe/Au/Co/Au

- Wprowadzenie
- Struktura i własności magnetyczne
- Korelacja namagnesowanie-opór
- Modyfikacje struktury
- Podsumowanie

Struktura warstw



Podłoże: naturalnie utleniony Si(100)

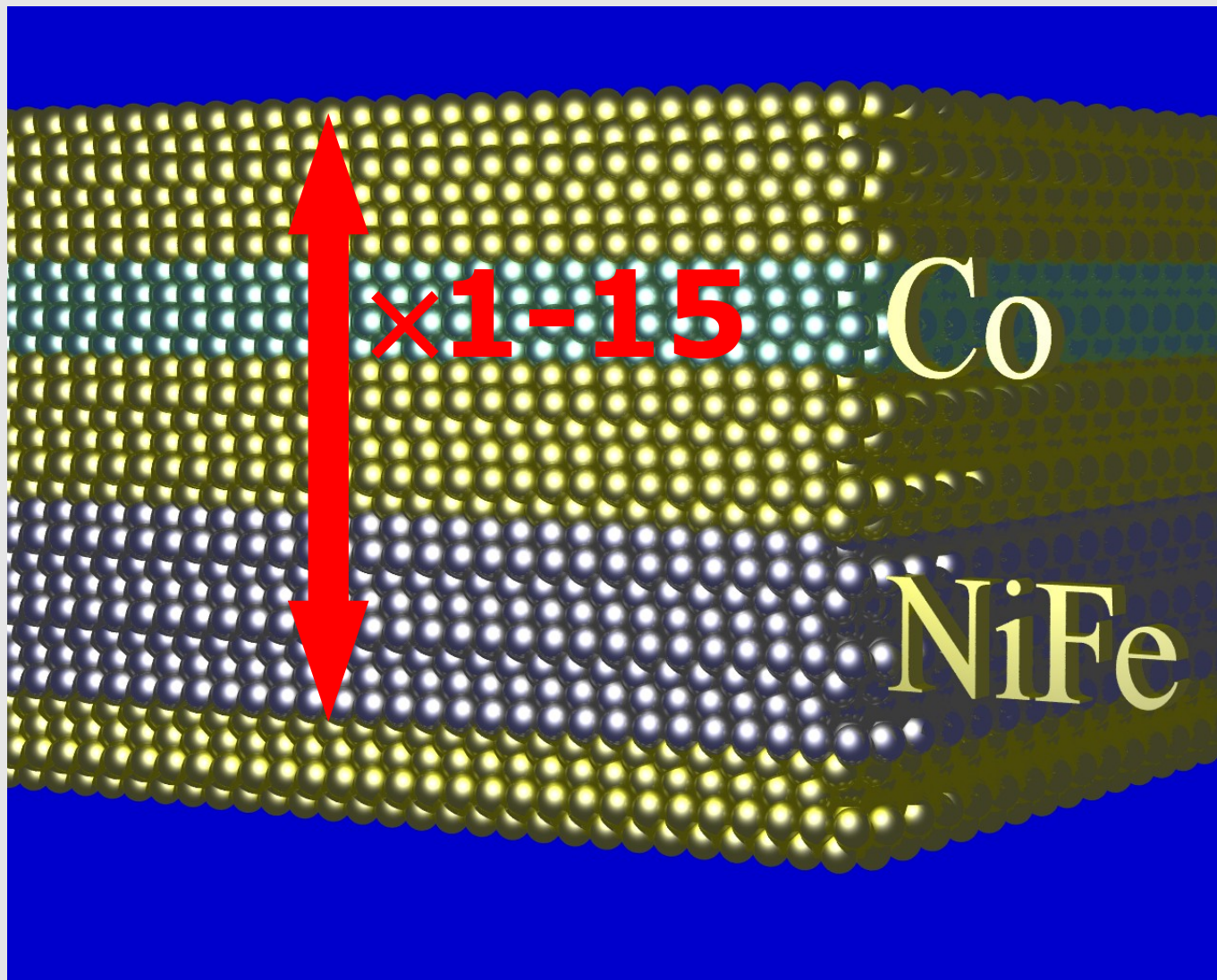
$t_{\text{Co}} = 0.2-1.5 \text{ nm}$

$t_{\text{NiFe}} = 0.5-4 \text{ nm}$

$t_{\text{Au}} = 1.5-3 \text{ nm}$

Rozpylanie katodowe

Struktura warstw



Podłoże: naturalnie utleniony Si(100)

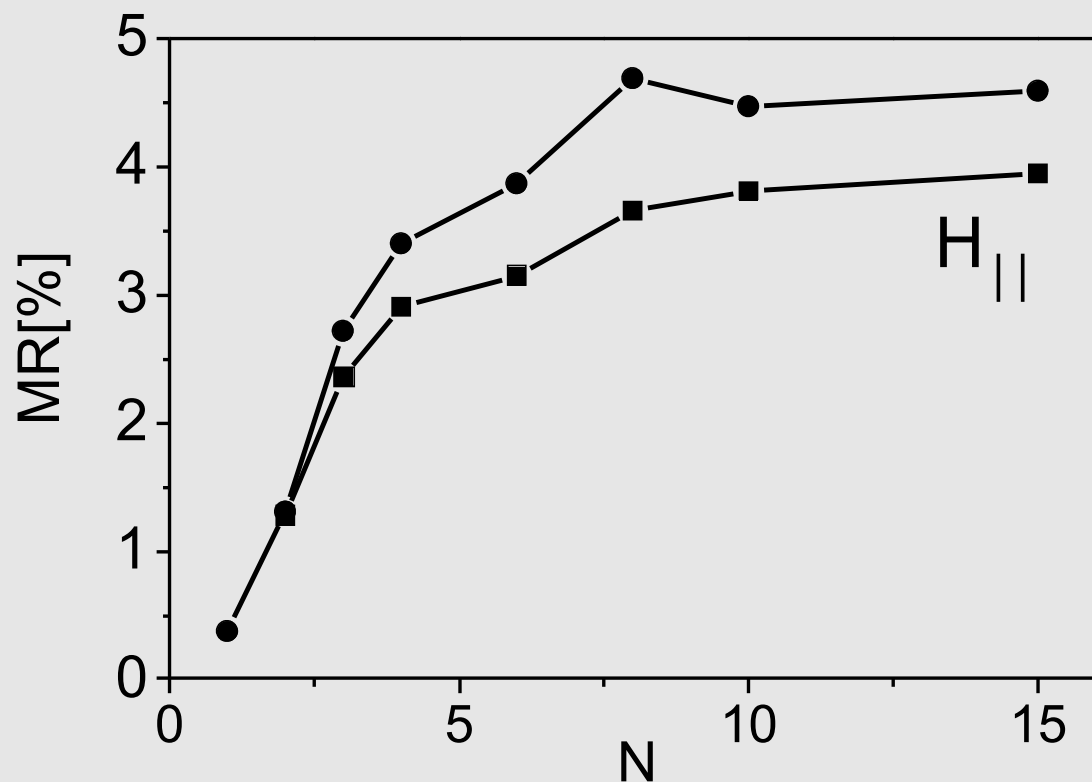
$$t_{\text{Co}} = 0.2 - 1.5 \text{ nm}$$

$$t_{\text{NiFe}} = 0.5 - 4 \text{ nm}$$

$$t_{\text{Au}} = 1.5 - 3 \text{ nm}$$

Rozpylanie katodowe

Struktura warstw



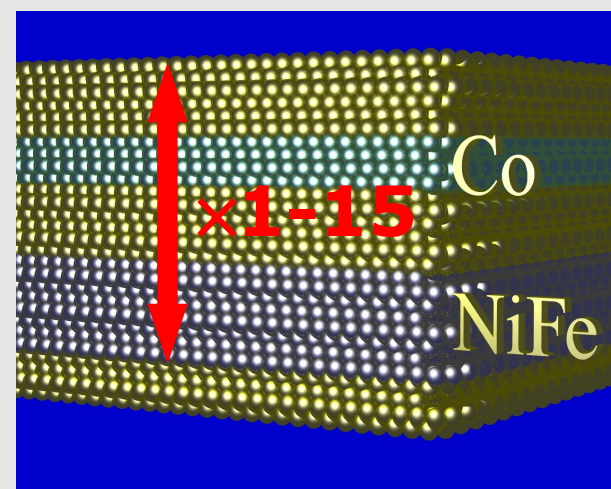
$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(2 \text{ nm})/\text{Au}(3 \text{ nm})/\text{Co}(0.8 \text{ nm})/\text{Au}(3 \text{ nm})]_N$

Podłoże: naturalnie utleniony Si(100)

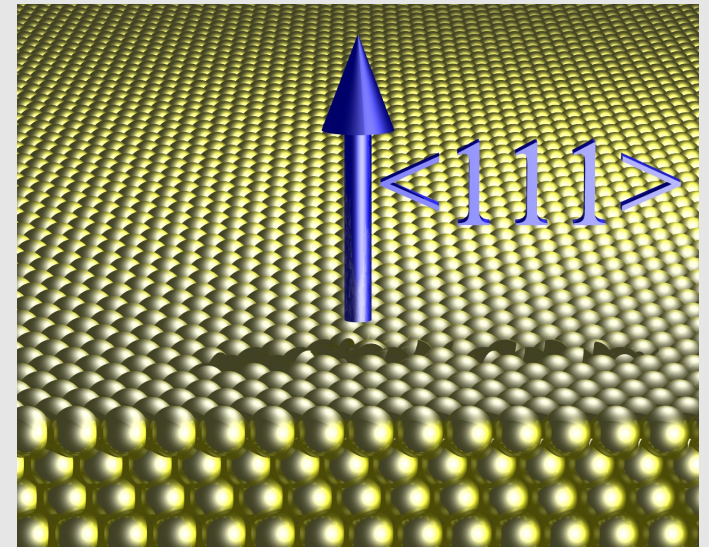
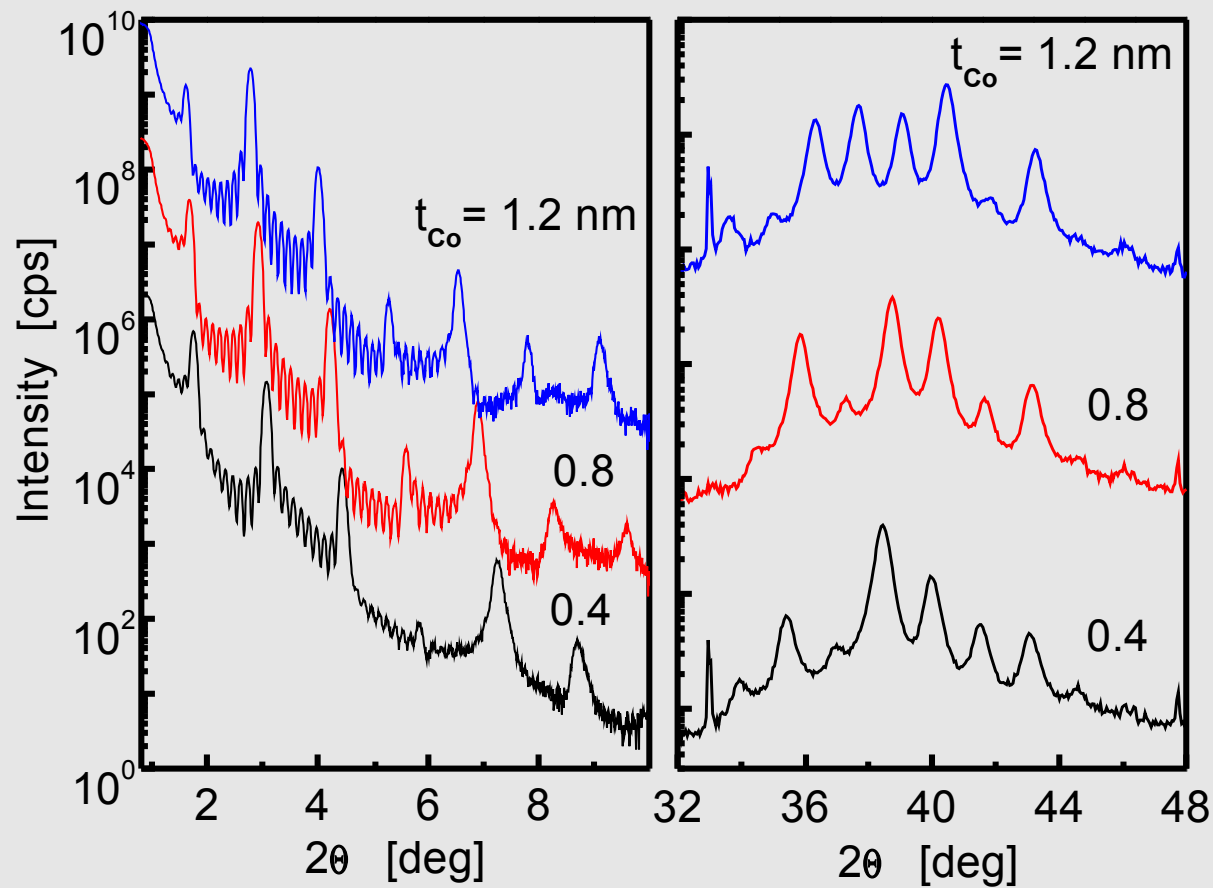
$t_{\text{Co}} = 0.2 - 1.5 \text{ nm}$

$t_{\text{NiFe}} = 0.5 - 4 \text{ nm}$

$t_{\text{Au}} = 1.5 - 3 \text{ nm}$



Struktura warstw

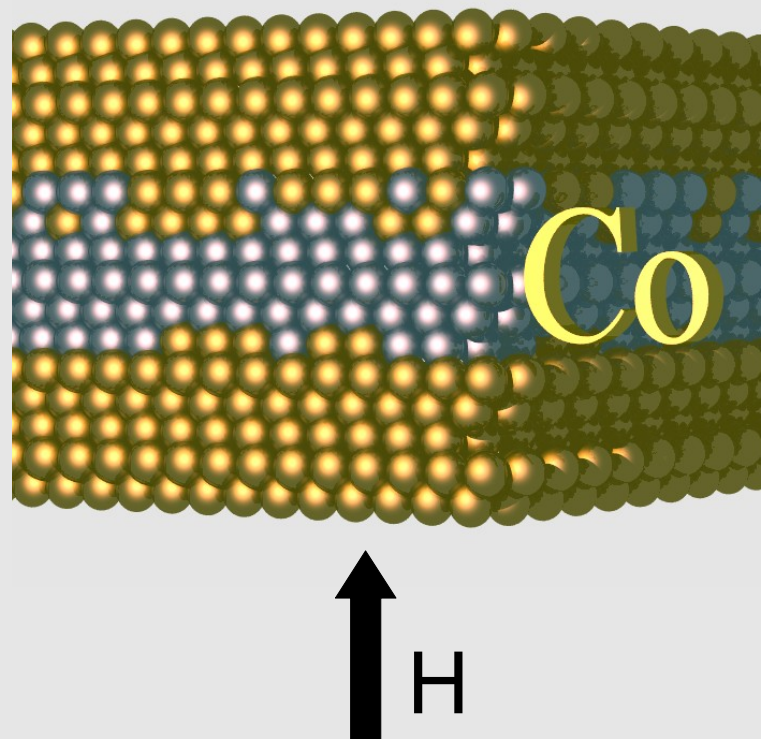
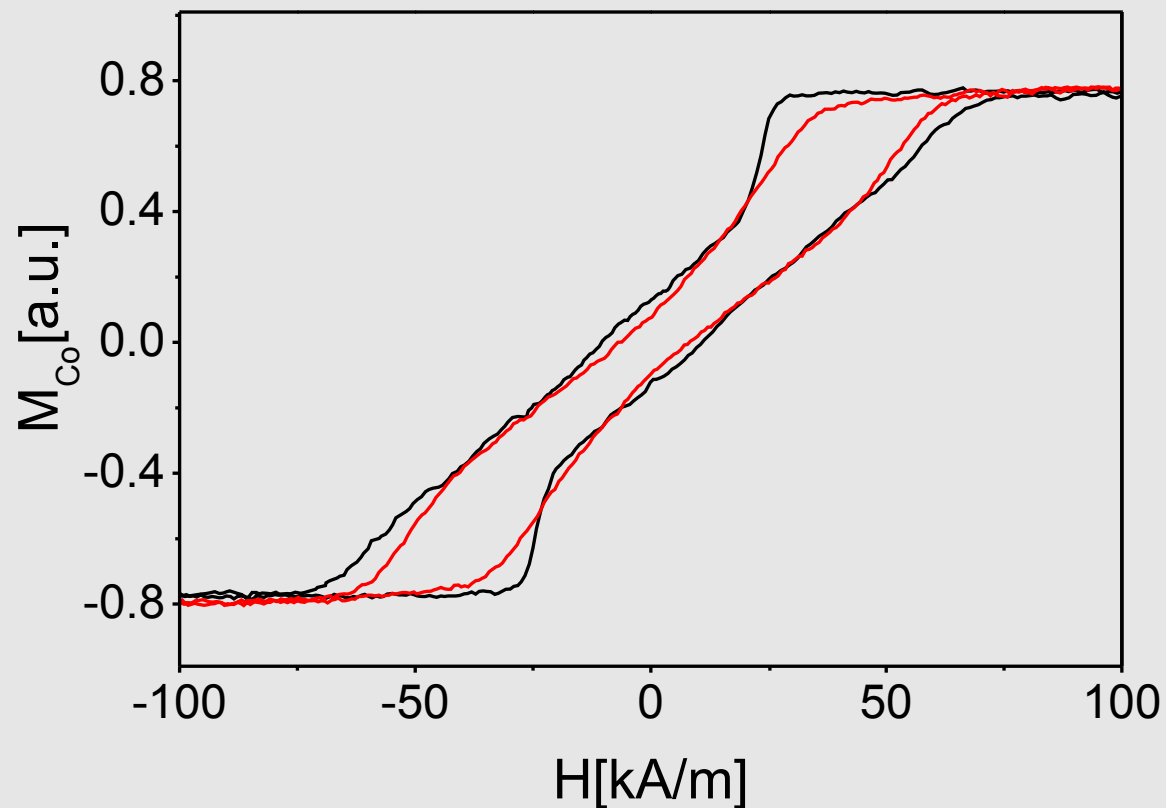


fcc (111)



Cu K α

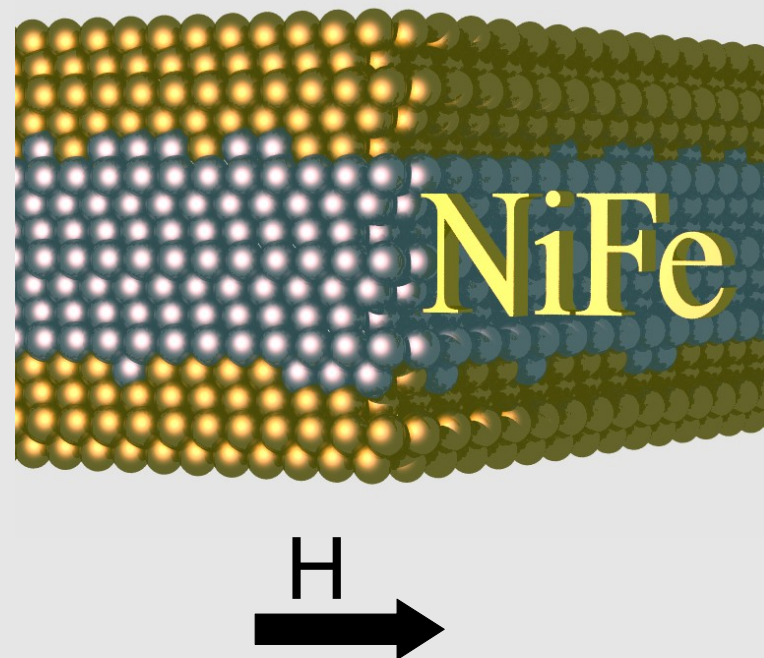
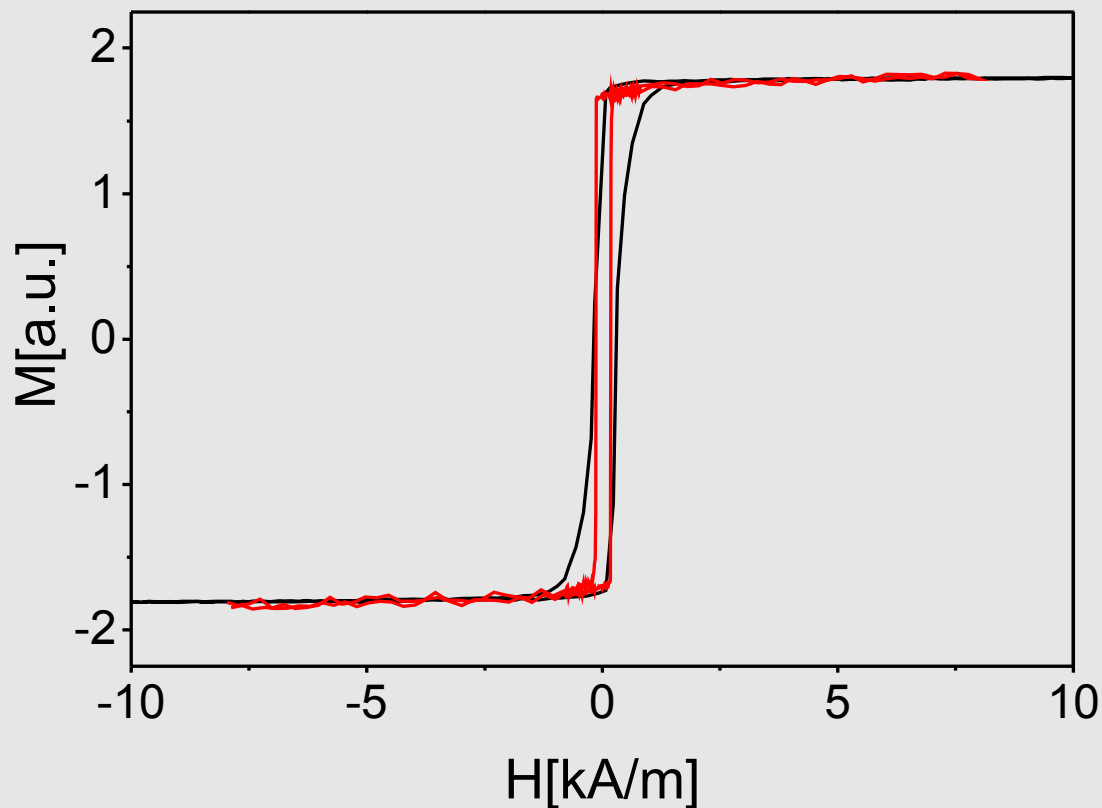
Własności magnetyczne



$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(2 \text{ nm})/\text{Au}(1.9 \text{ nm})/\mathbf{\text{Co}(0.6 \text{ nm})}/\text{Au}(1.9 \text{ nm})]_{10}$

$[\text{Co}(0.6 \text{ nm})/\text{Au}(4.4 \text{ nm})]_{15}$

Własności magnetyczne

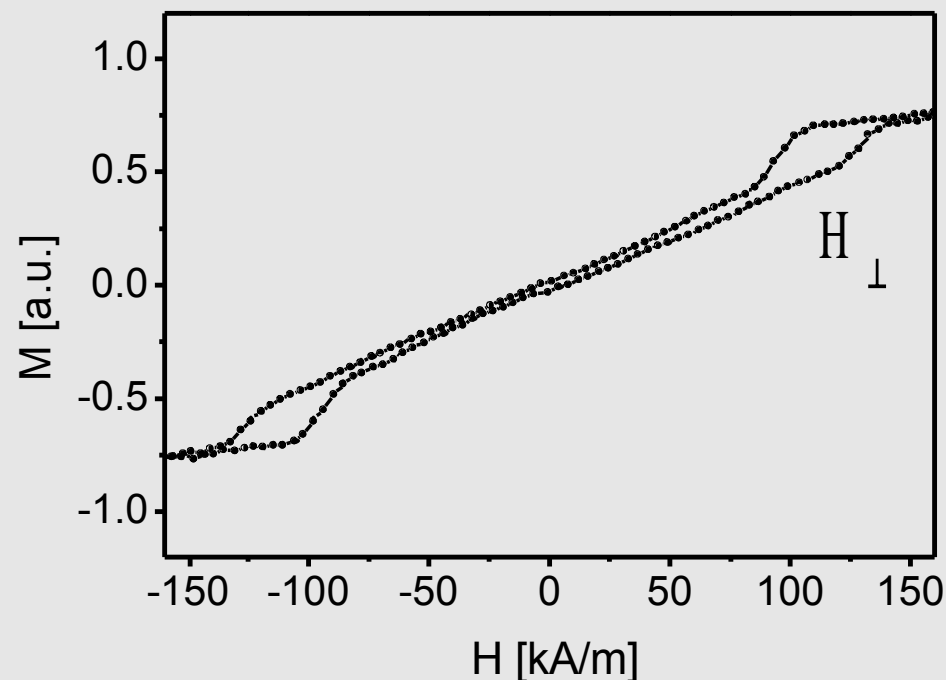
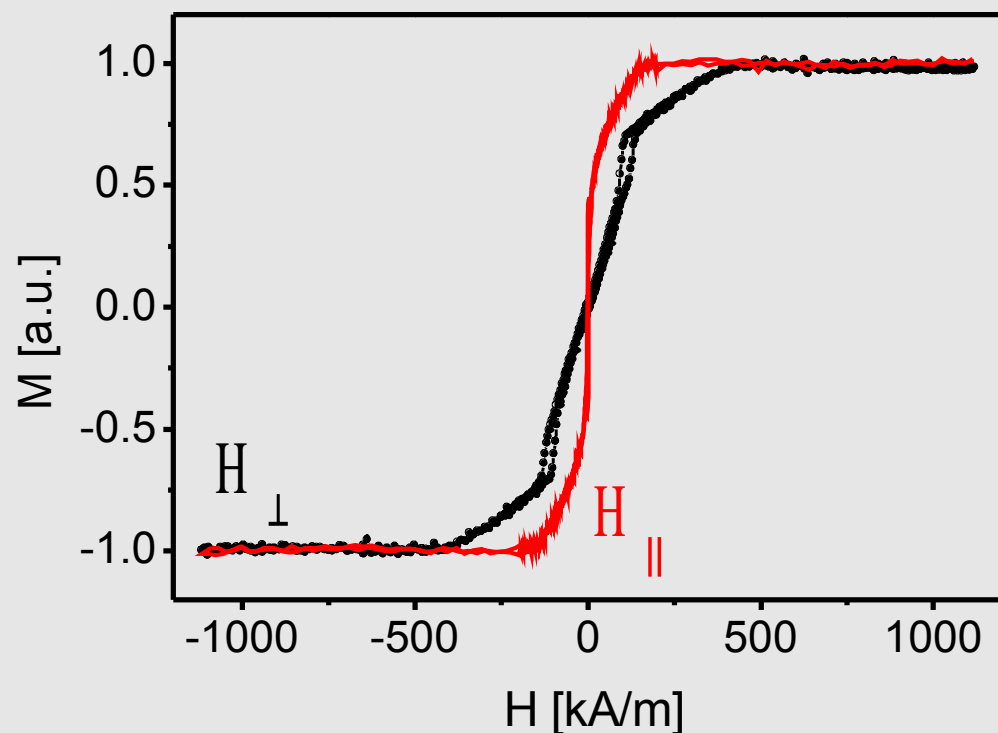


$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(2 \text{ nm})/\text{Au}(5 \text{ nm})]_{15}$

$\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(38 \text{ nm})$

$\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ - materiał miękki magnetycznie, $H_C \approx 160 \text{ A/m}$

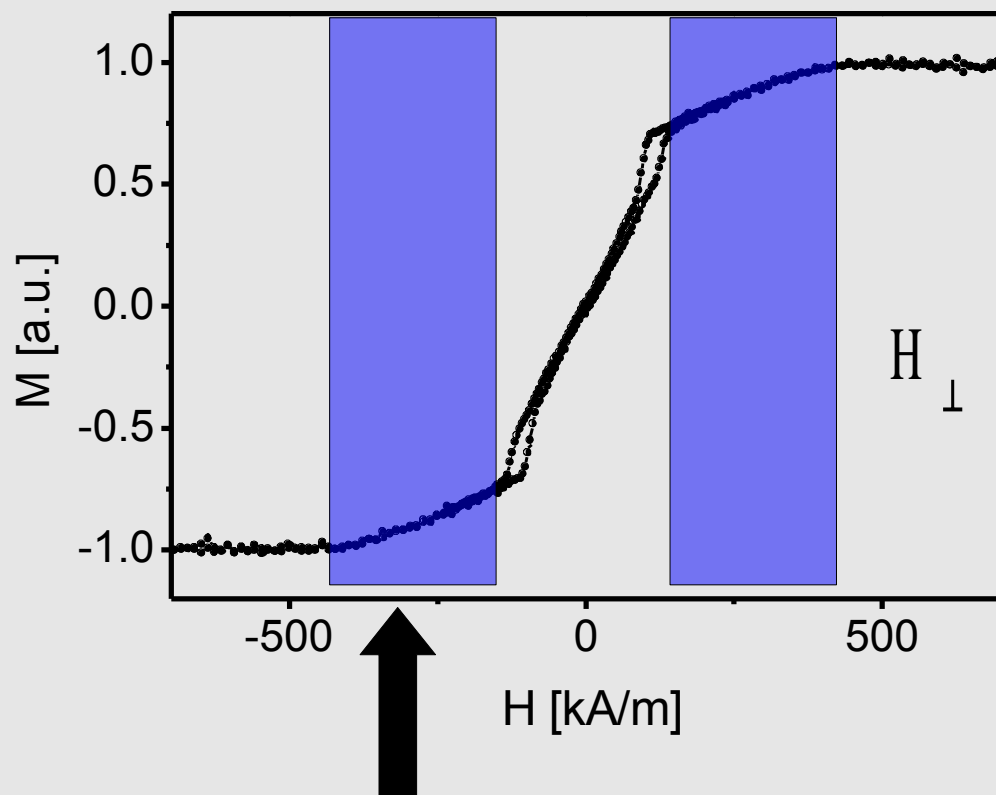
Własności magnetyczne



- Środkowy obszar pętli w polu prostopadłym jest charakterystyczny dla układów z **pasiastą strukturą domenową**
- Dla obu konfiguracji pola warstwy Co i NiFe przemagnesowują się quasi niezależnie

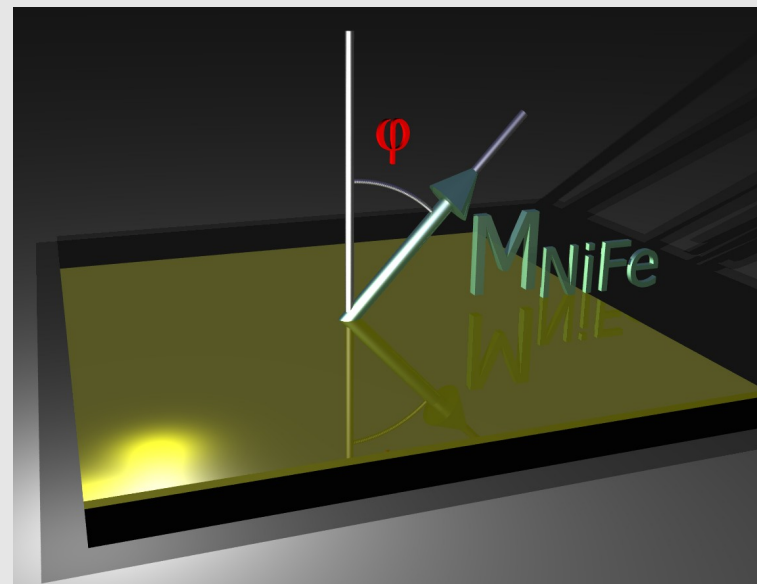
$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(2 \text{ nm})/\text{Au}(1.9 \text{ nm})/\text{Co}(0.8 \text{ nm})/\text{Au}(1.9 \text{ nm})]_N$

Własności magnetyczne



przemagnesowanie
NiFe

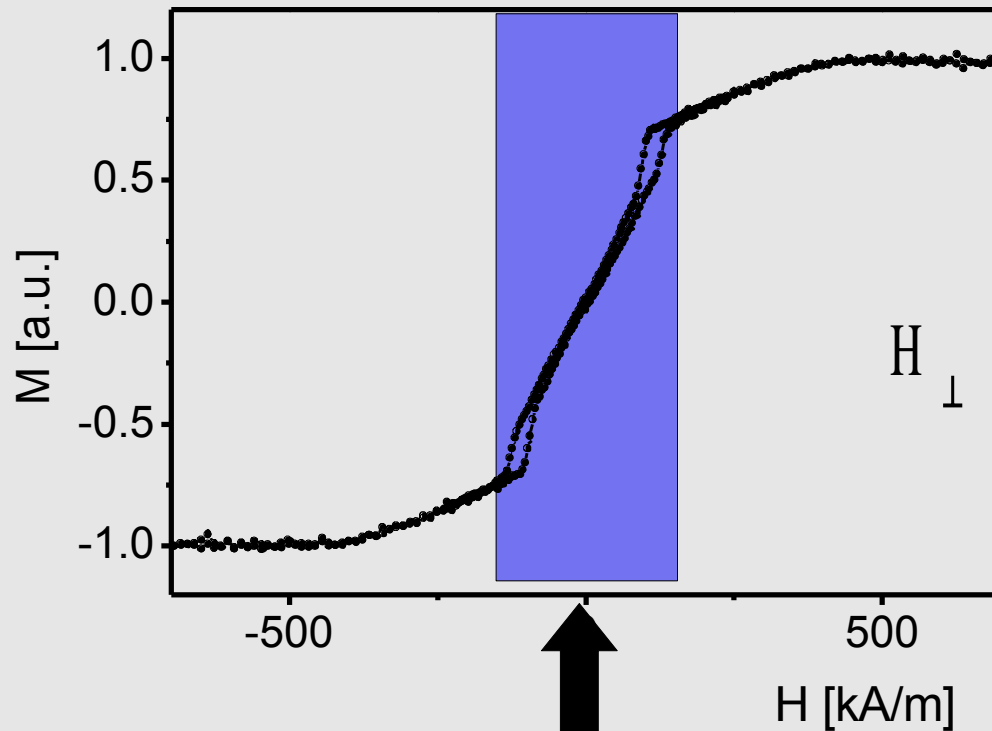
$$K_u = \frac{1}{2} \mu_0 (M_S^{NiFe})^2$$



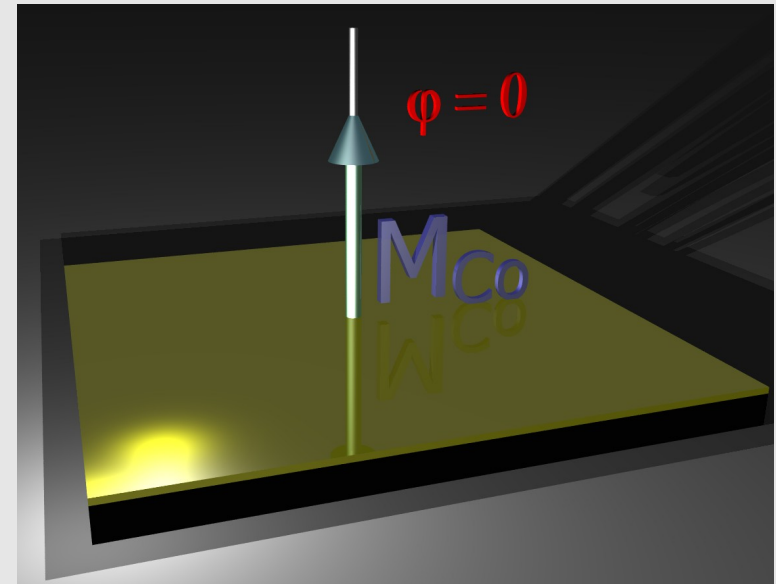
Anizotropia kształtu:

$$\cos(\varphi) = \frac{H}{M_S}$$

Własności magnetyczne

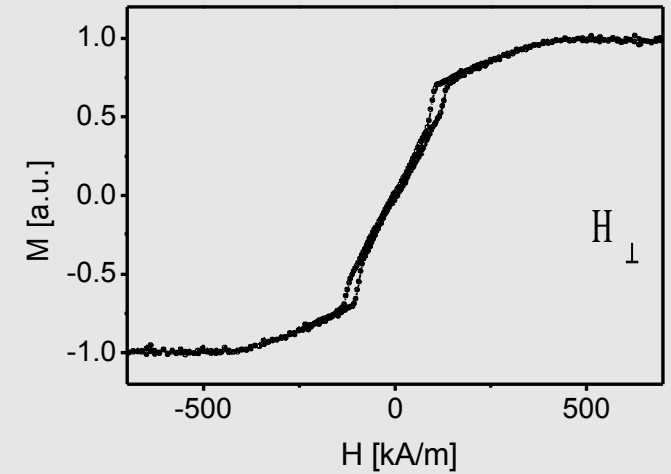
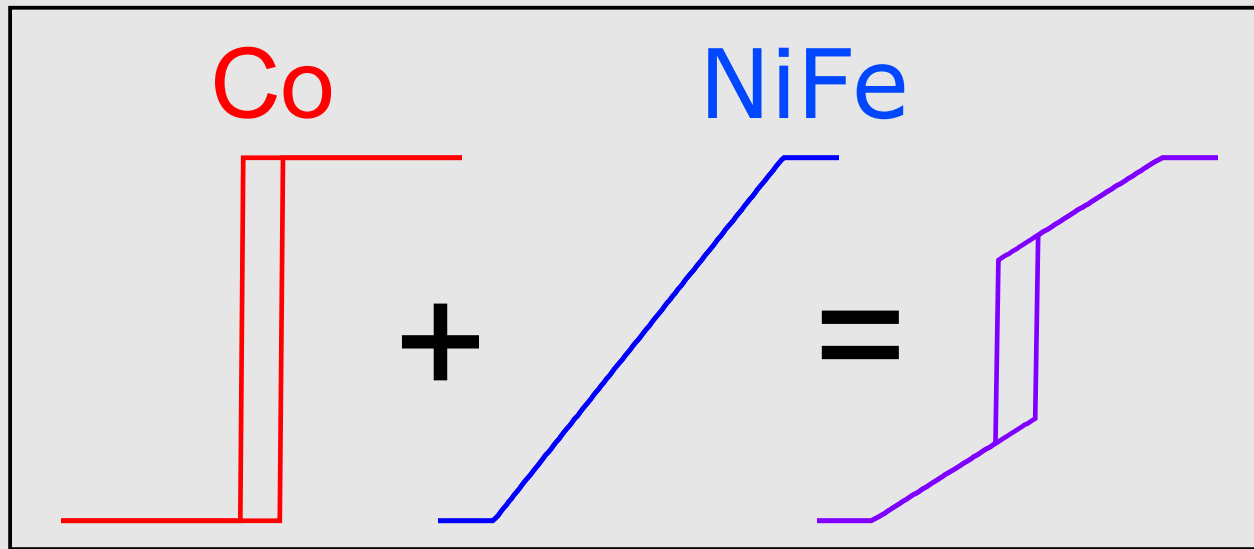


przemagnesowanie
NiFe i Co



Oś łatwa warstw Co jest
prostopadła do powierzchni
warstwy wielokrotnej

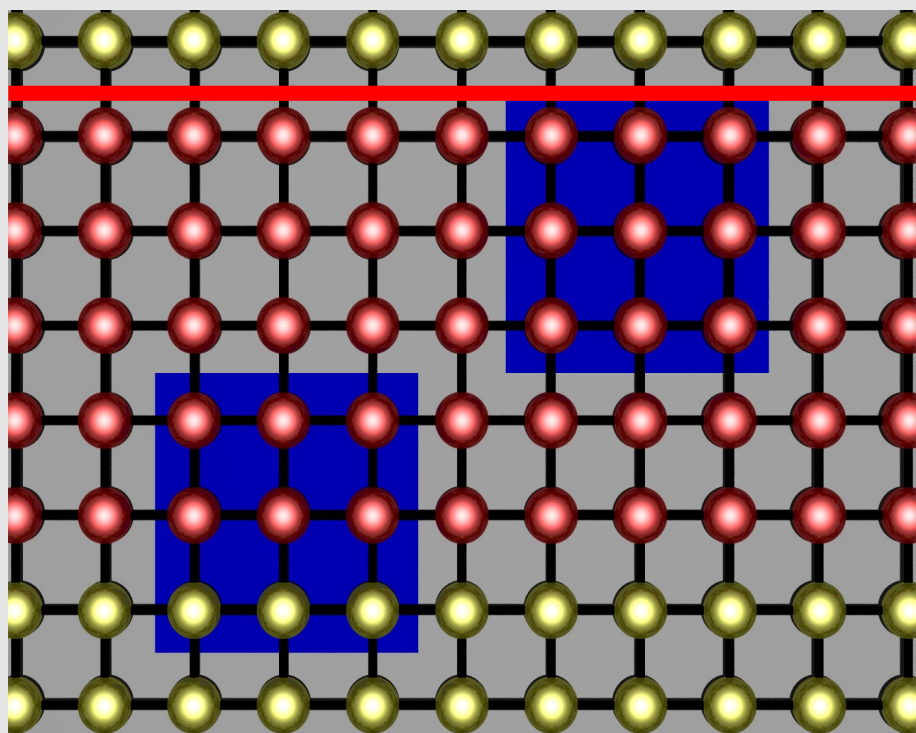
Własności magnetyczne



W pierwszym przybliżeniu warstwy Co i NiFe można traktować jako niesprężone

Zależność $M(H)$ struktury NiFe/Au/Co jest wtedy arytmetyczną sumą zależności $M(H)$ warstw Co i NiFe.

Własności magnetyczne - warstwa Co



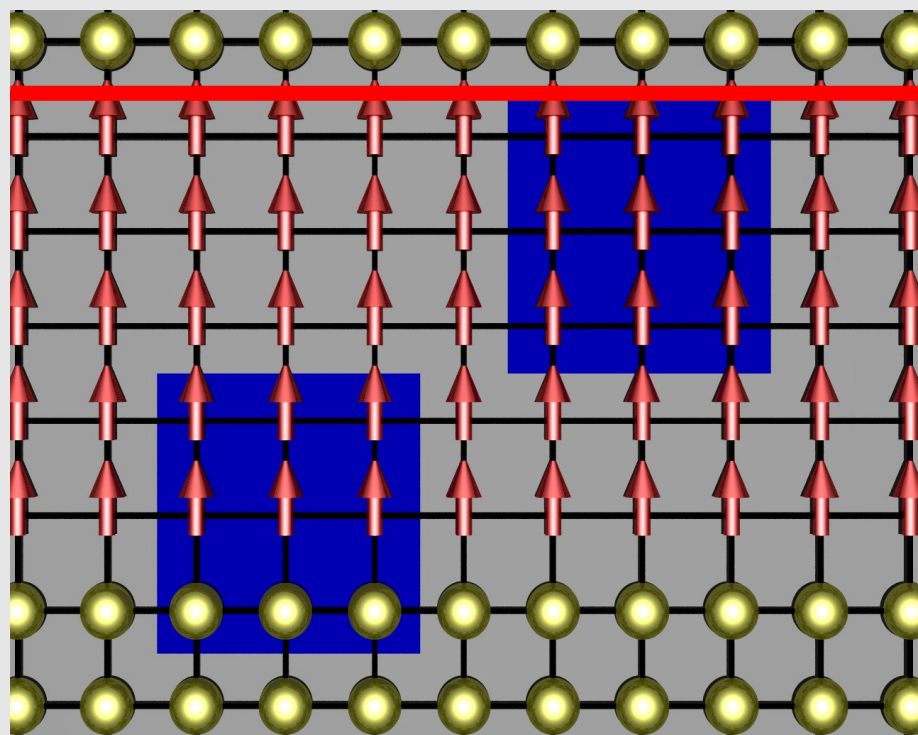
Zmiana lokalnej symetrii na interfejsie



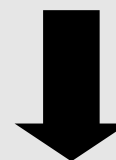
W układach Co/Au powstaje powierzchniowy przyczynek do anizotropii magnetycznej

W badanych układach grubość warstw Co jest porównywalna z odległościami międzypłaszczyznowymi w kierunku prostopadłym do warstwy \Rightarrow silny udział efektów powierzchniowych.

Własności magnetyczne - warstwa Co



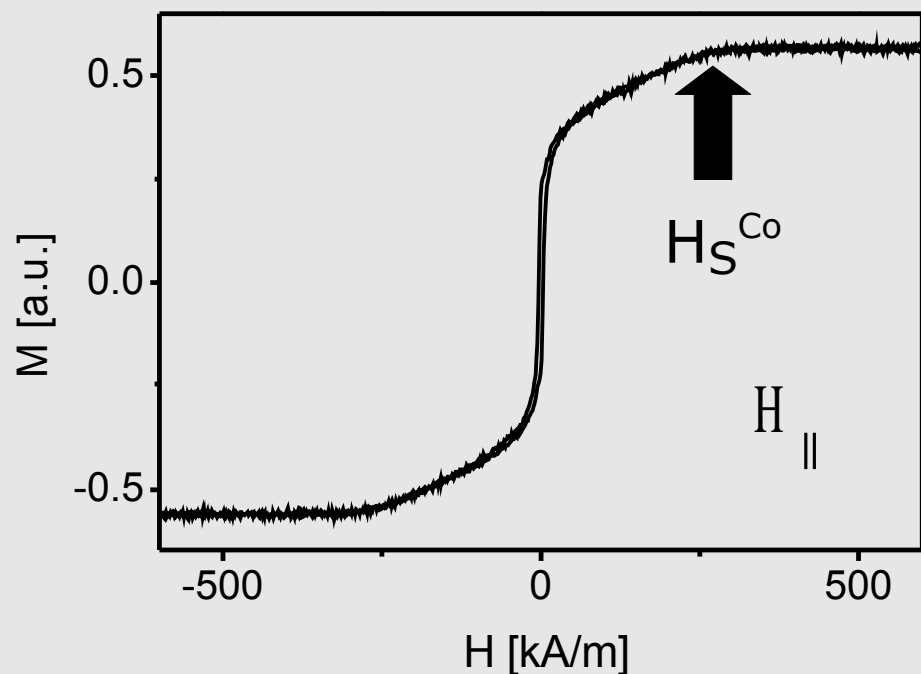
Zmiana lokalnej symetrii na interfejsie



W układach Co/Au powstaje powierzchniowy przyczynek do anizotropii magnetycznej (K_{1s})

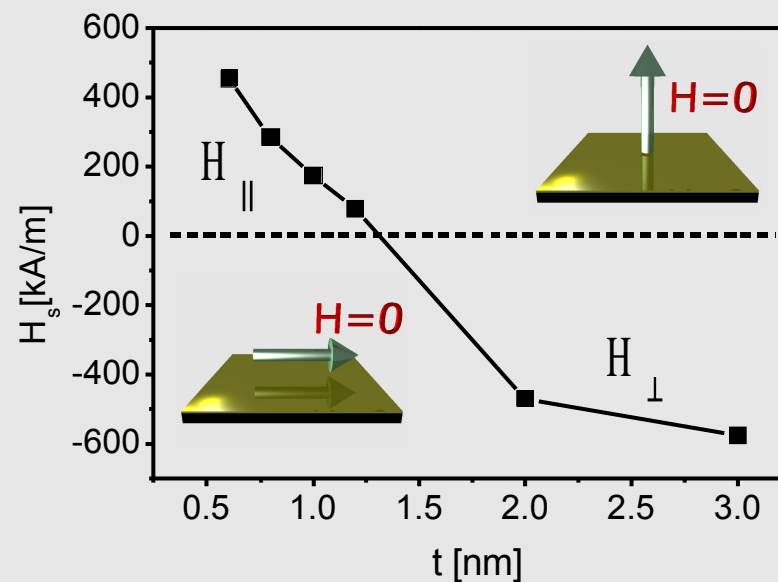
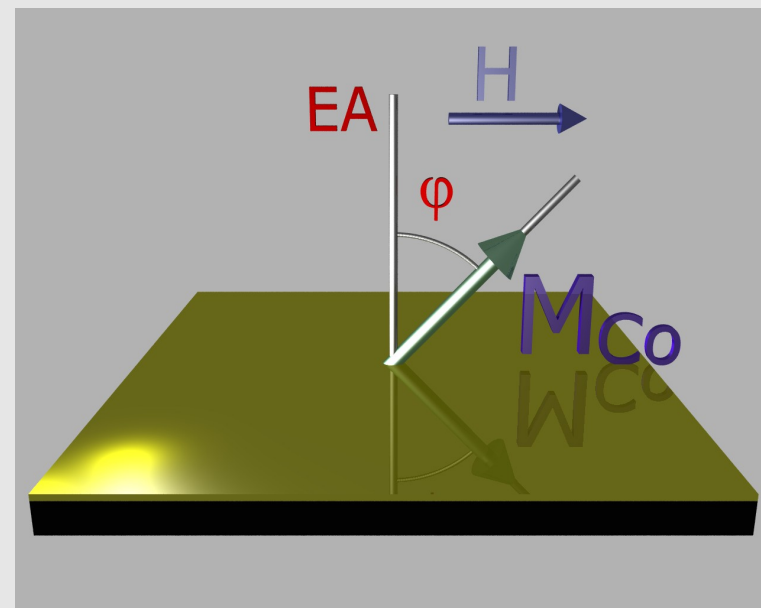
$$K_{eff} = \frac{2 K_{1s}}{t_{Co}} + K_{1v} - \frac{1}{2} \mu_0 (M_S^{Co})^2$$

Własności magnetyczne - warstwa Co

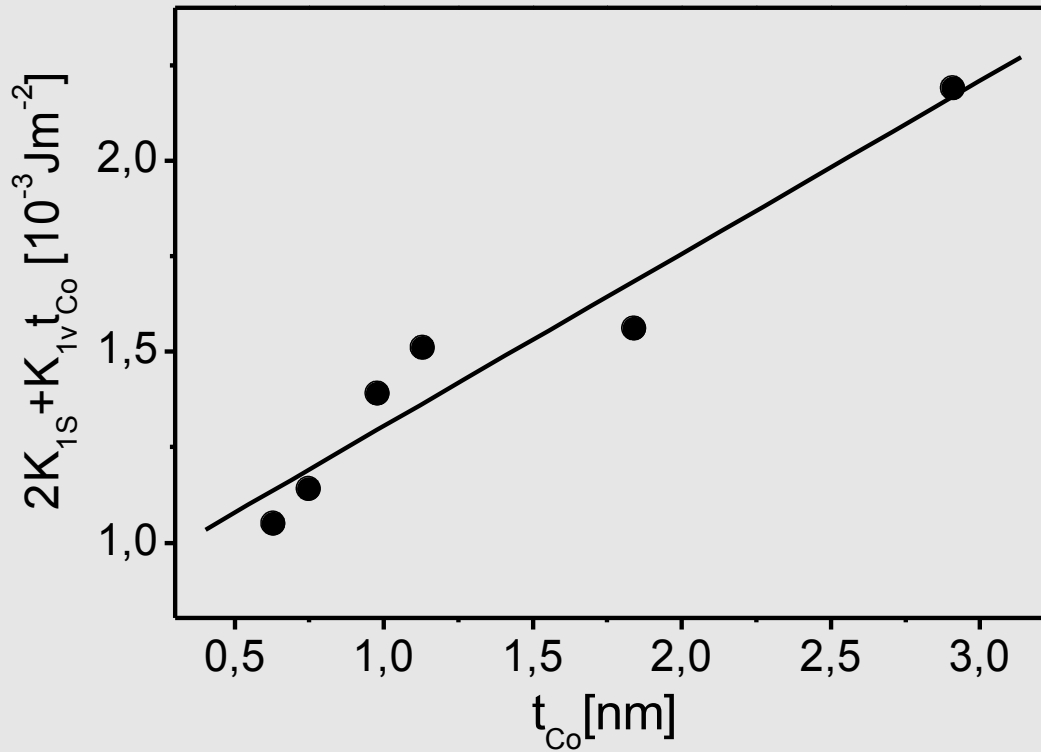


$$K_{eff} = \frac{2K_{1s}}{t_{Co}} + K_{1v} - \frac{1}{2}\mu_0(M_S^{Co})^2$$

$$H_S = \frac{2K_{eff}}{M_S^{Co}}$$



Własności magnetyczne - warstwa Co

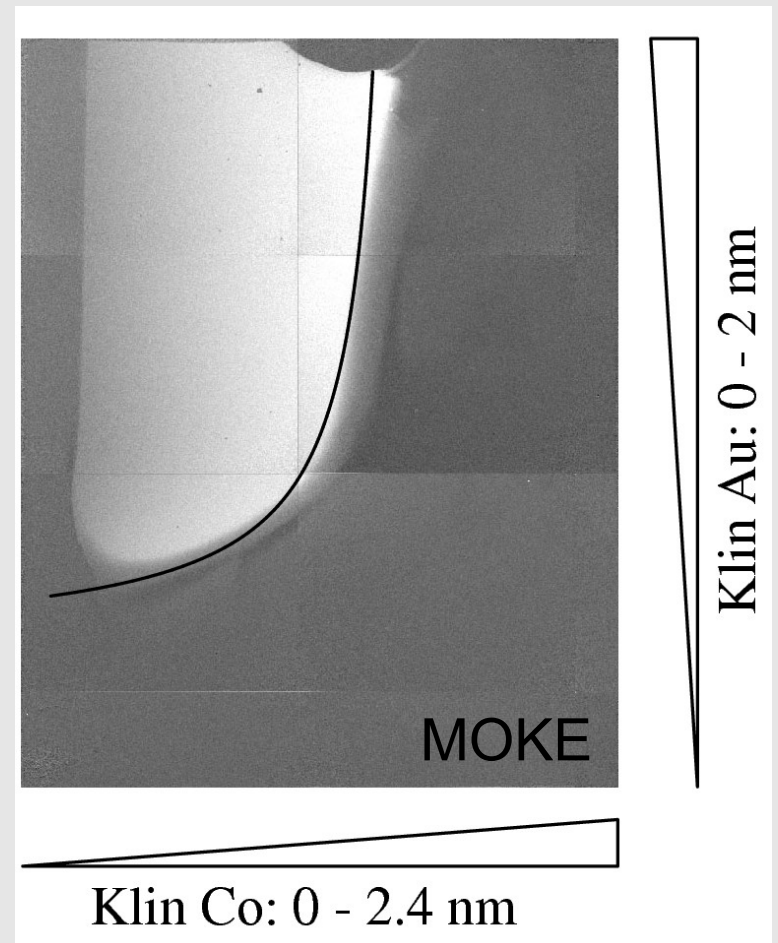


$$K_{1s} = 4.25 \times 10^{-4} \text{ Jm}^{-2}$$

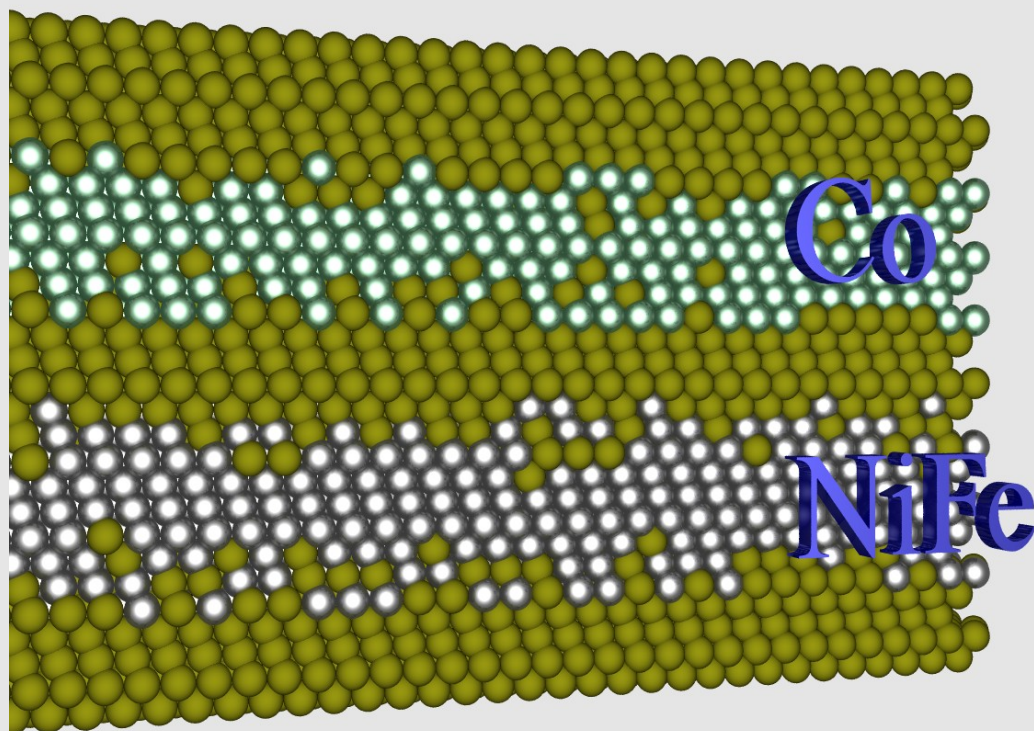
$$K_{1v} = 452 \times 10^3 \text{ Jm}^{-3}$$

$$\frac{1}{2} (M_S^{Co} H_S + \mu_0 (M_S^{Co})^2) = \frac{2 K_{1s}}{t_{Co}} + K_{1v}$$

[Ni₈₀Fe₂₀(2 nm)/Au(3 nm)]₁₀/Au(0-2 nm)/
Co(0-2.4 nm)/Au(3 nm)

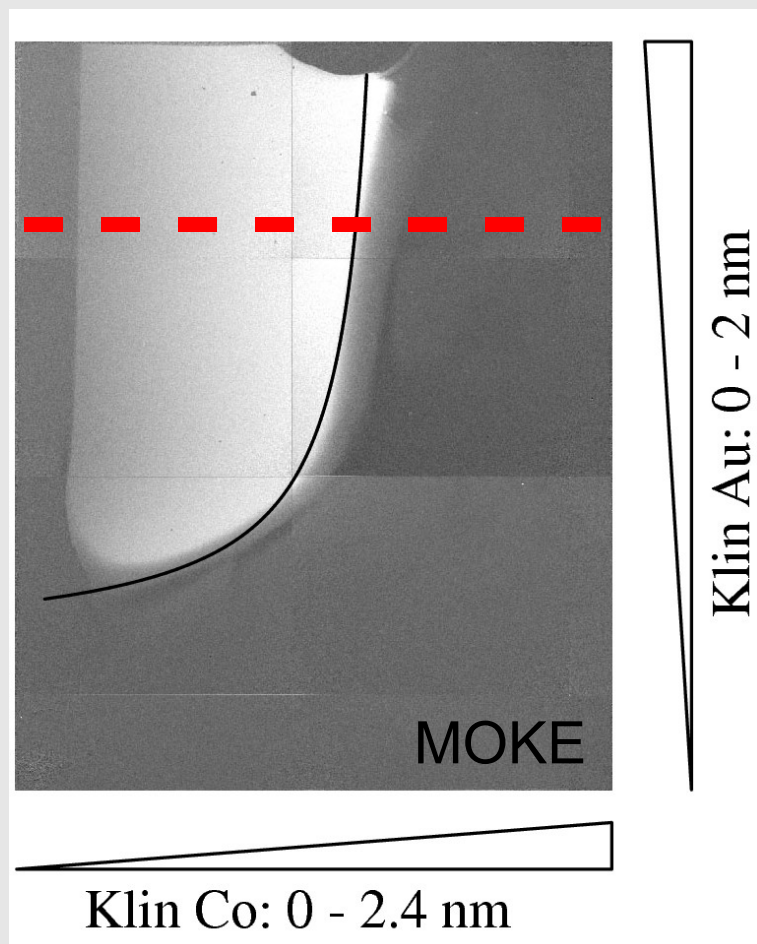


Własności magnetyczne - sprzężenie Co-NiFe

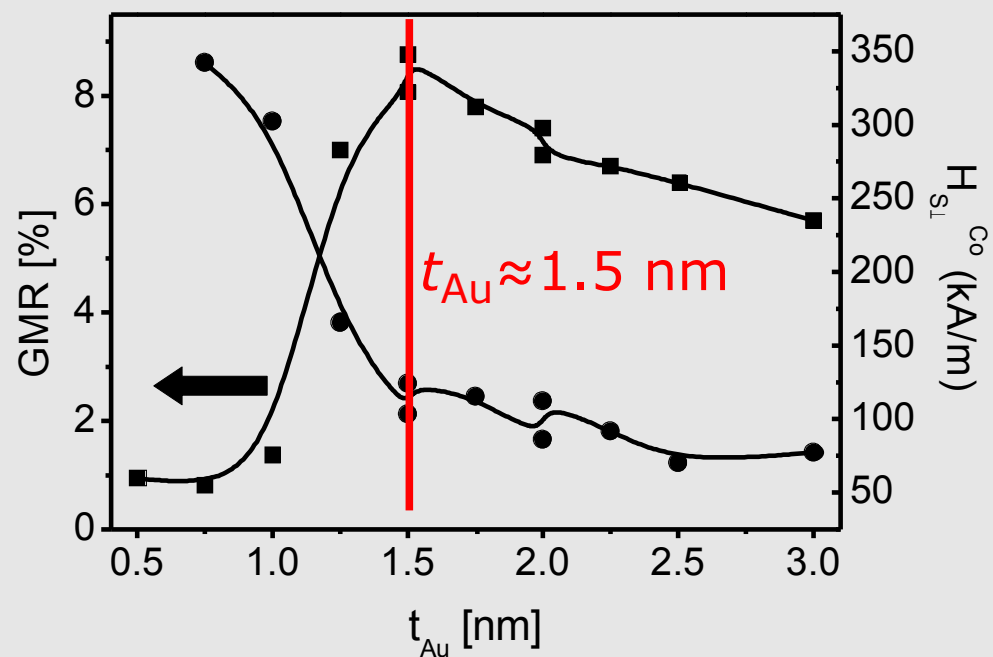


Dla małych t_{Au} mostki ferromagnetyczne (pinhole) prowadzą do bezpośredniego sprzężenia między warstwami Co i NiFe.

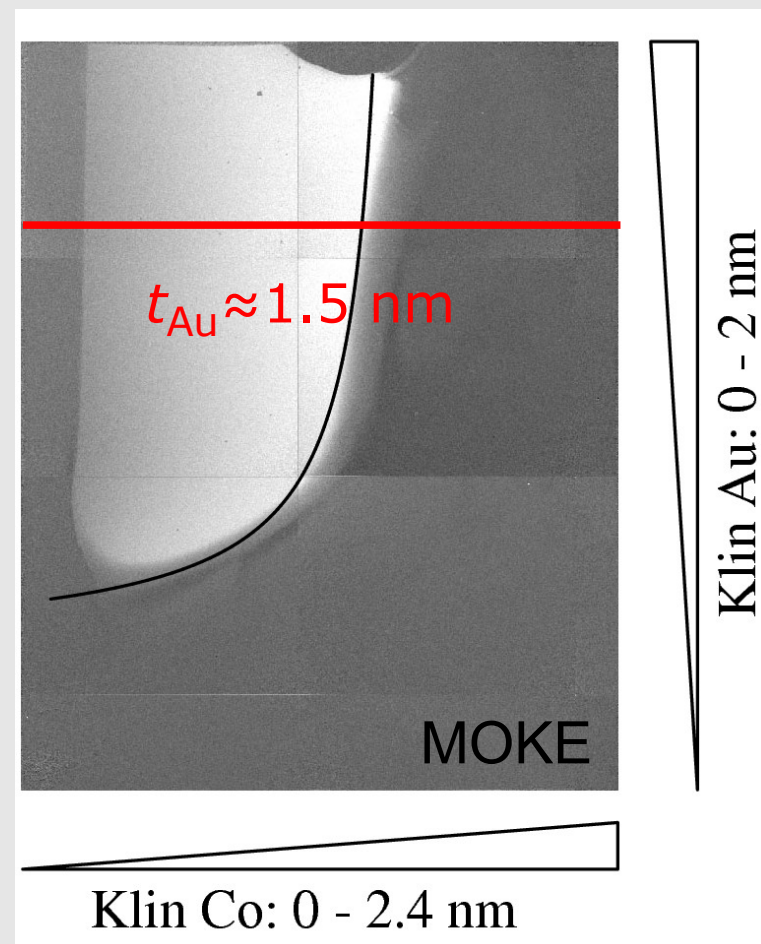
$t_{Au} \leq 1.5$ nm:
silne sprzężenie Co-NiFe
(mostki+magnetostatyczne)



Własności magnetyczne - sprzężenie Co-NiFe



$[Ni_{80}Fe_{20}(2 \text{ nm})/Au(t_{Au})/Co(0.6 \text{ nm})/Au(t_{Au})]_{15}$



Gigantyczny Magnetoopór (GMR)

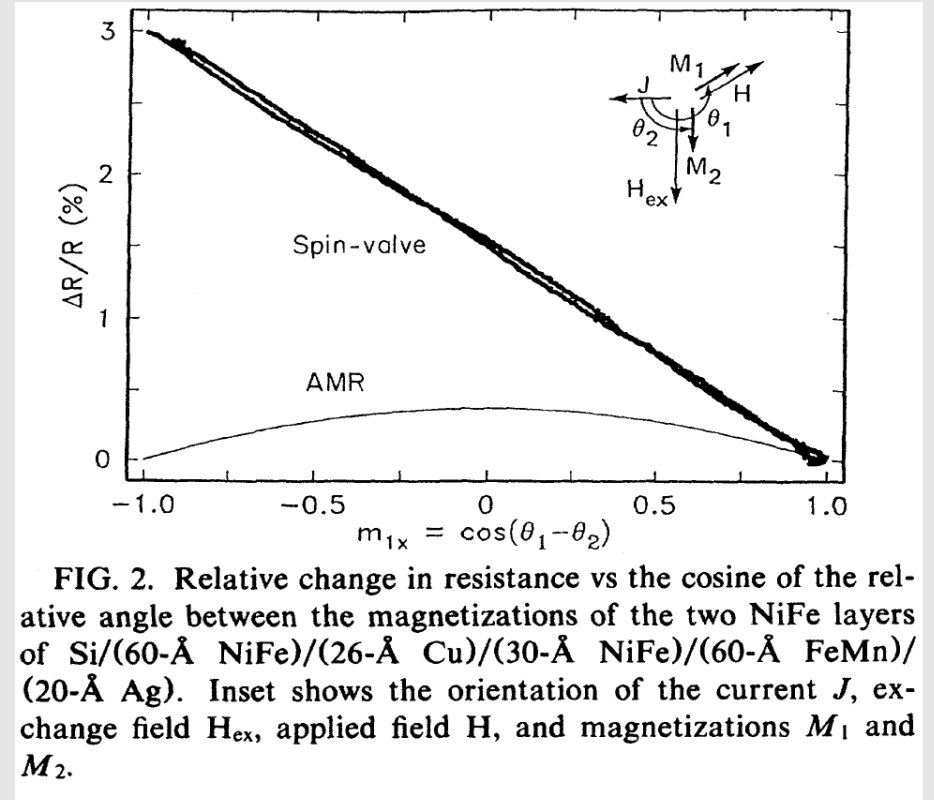
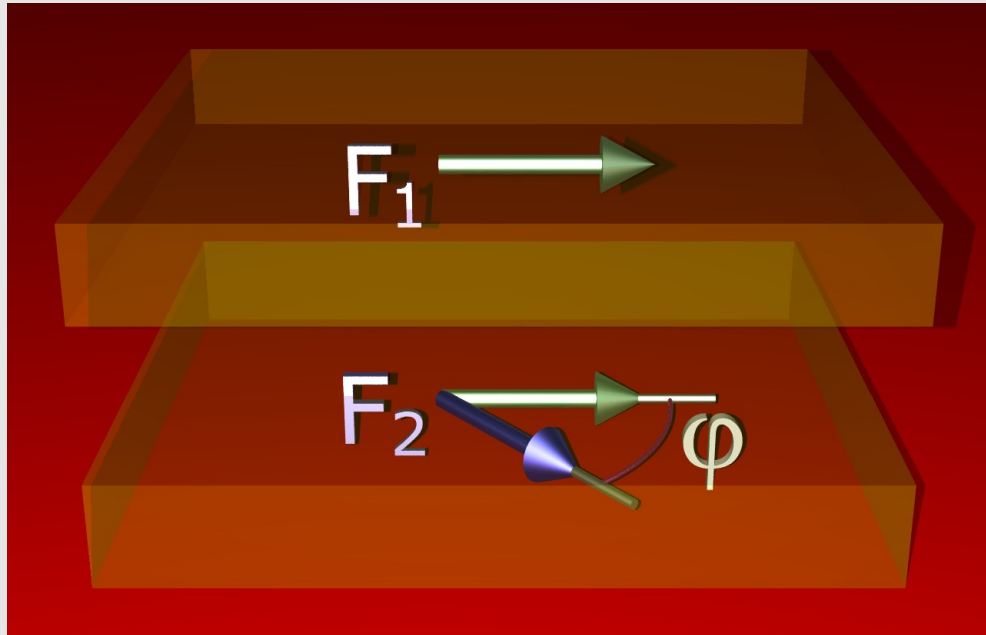
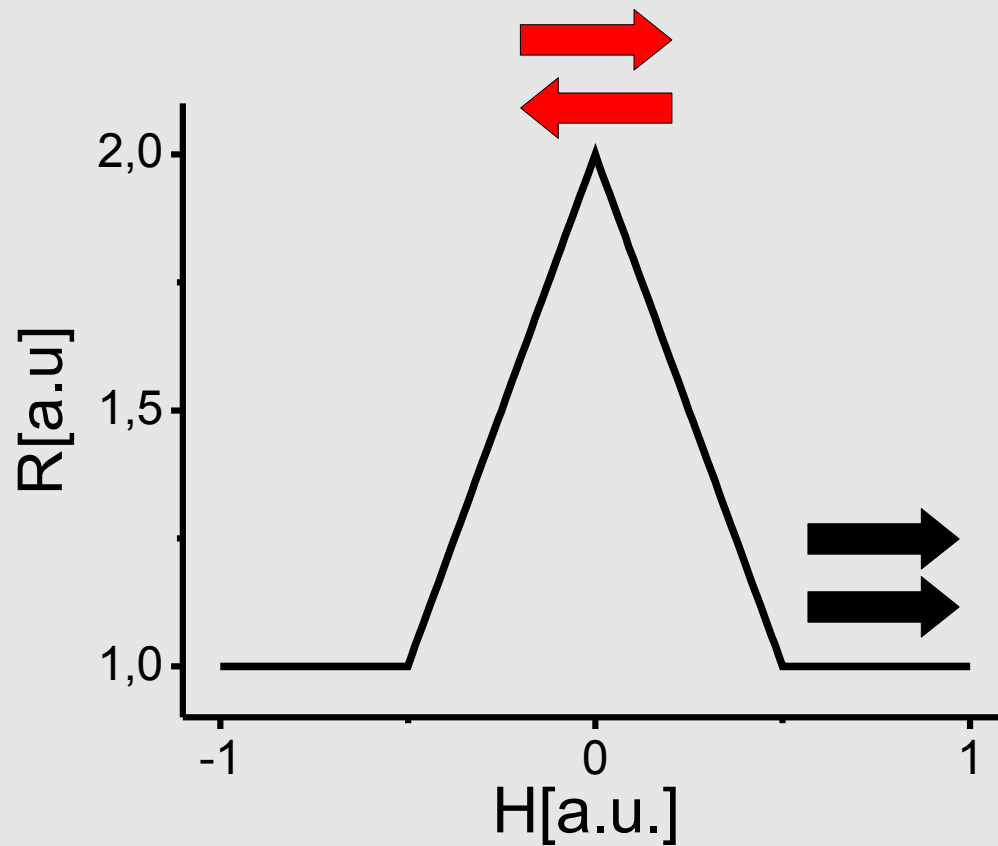


FIG. 2. Relative change in resistance vs the cosine of the relative angle between the magnetizations of the two NiFe layers of Si/(60-Å NiFe)/(26-Å Cu)/(30-Å NiFe)/(60-Å FeMn)/(20-Å Ag). Inset shows the orientation of the current J , exchange field H_{ex} , applied field H , and magnetizations M_1 and M_2 .

$$\Delta R \propto \cos(\varphi)$$

Gigantyczny Magnetoopór (GMR)

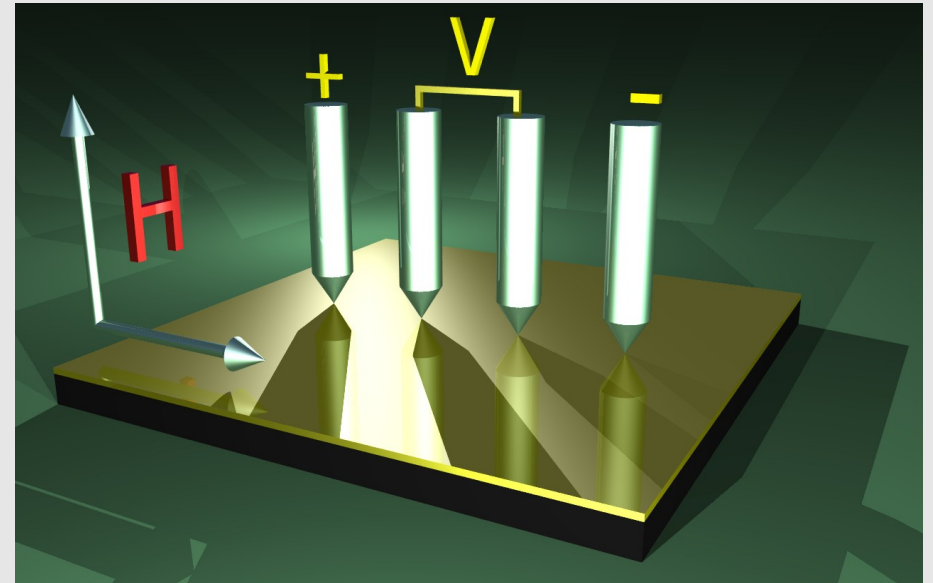
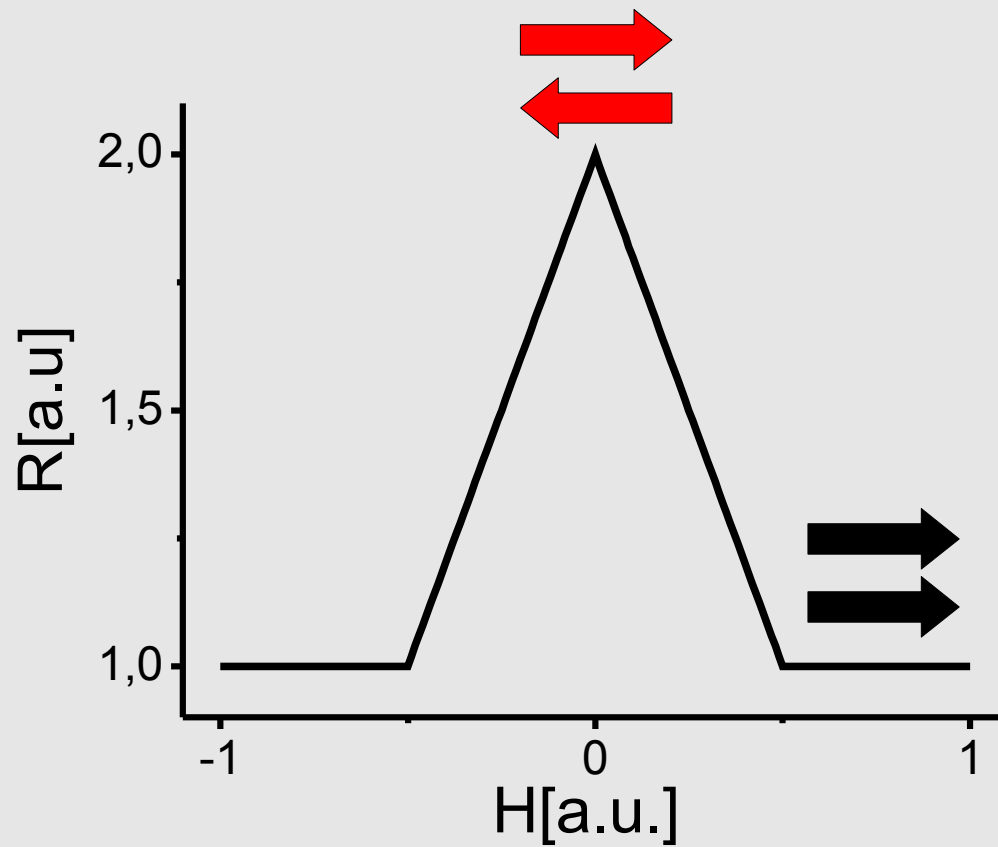


$$\Delta R/R_0 = 1 \div 100 \%$$

Co/Au,
NiFe/Au,
NiFe/Cu,
Fe/Au,.....

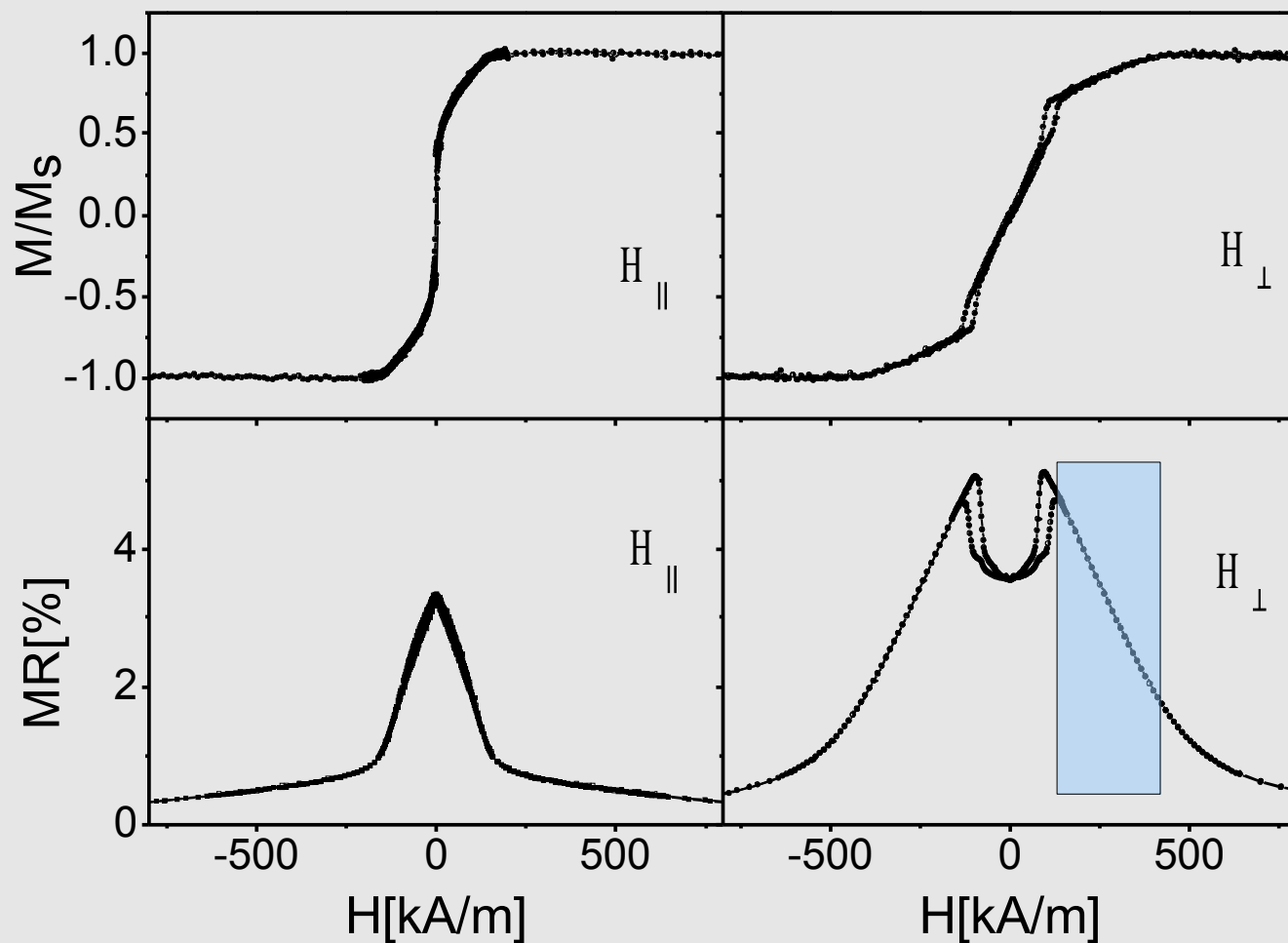
$$R = R_0 - \Delta R \cos(\varphi)$$

Gigantyczny Magnetoopór (GMR)



$$R = R_0 - \Delta R \cos(\varphi)$$

Gigantyczny Magnetoopór (GMR)



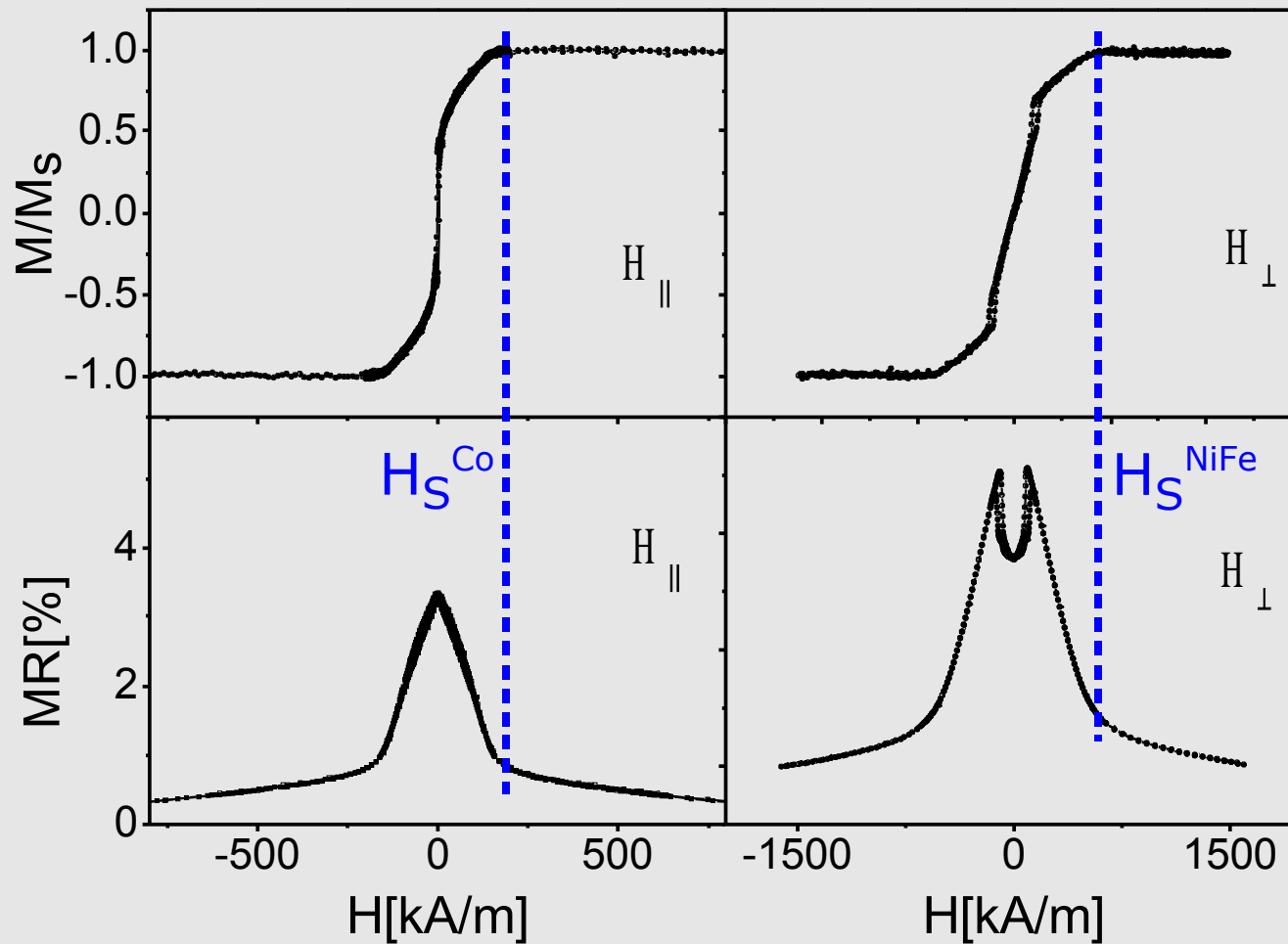
Szeroki zakres
liniowości
zależności $R(H)$:

-przemagnesowanie
warstwy magnety-
cznej w kierunku
prostopadłym do
osi łatwej.

-możliwość stosowa-
nia w sensorach pola
magnetycznego
(bezhisterezość)

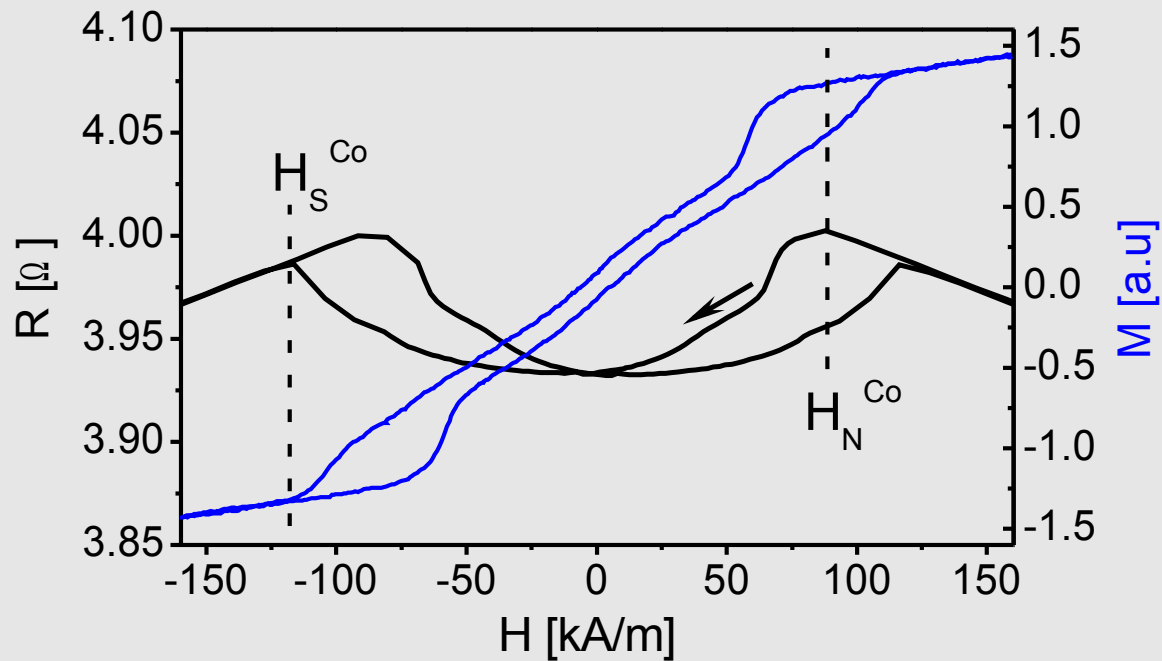
$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(2 \text{ nm})/\text{Au}(1.9 \text{ nm})/\text{Co}(1 \text{ nm})/\text{Au}(1.9 \text{ nm})]_{10}$

Gigantyczny Magnetoopór (GMR)



Wypadkowe pole nasycające odpowiada warstwie przemagnesowywanej w kierunku trudnym.

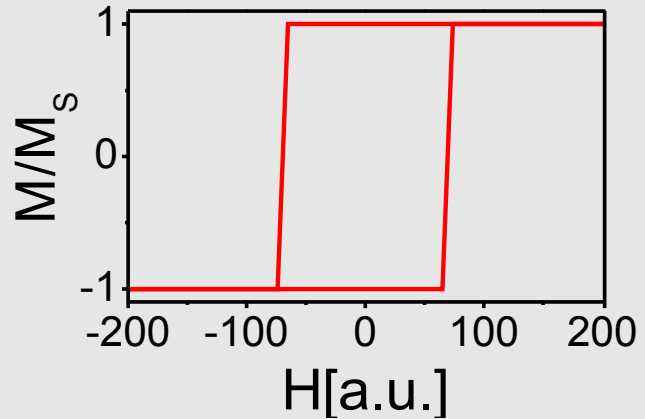
Gigantyczny Magnetoopór (GMR)



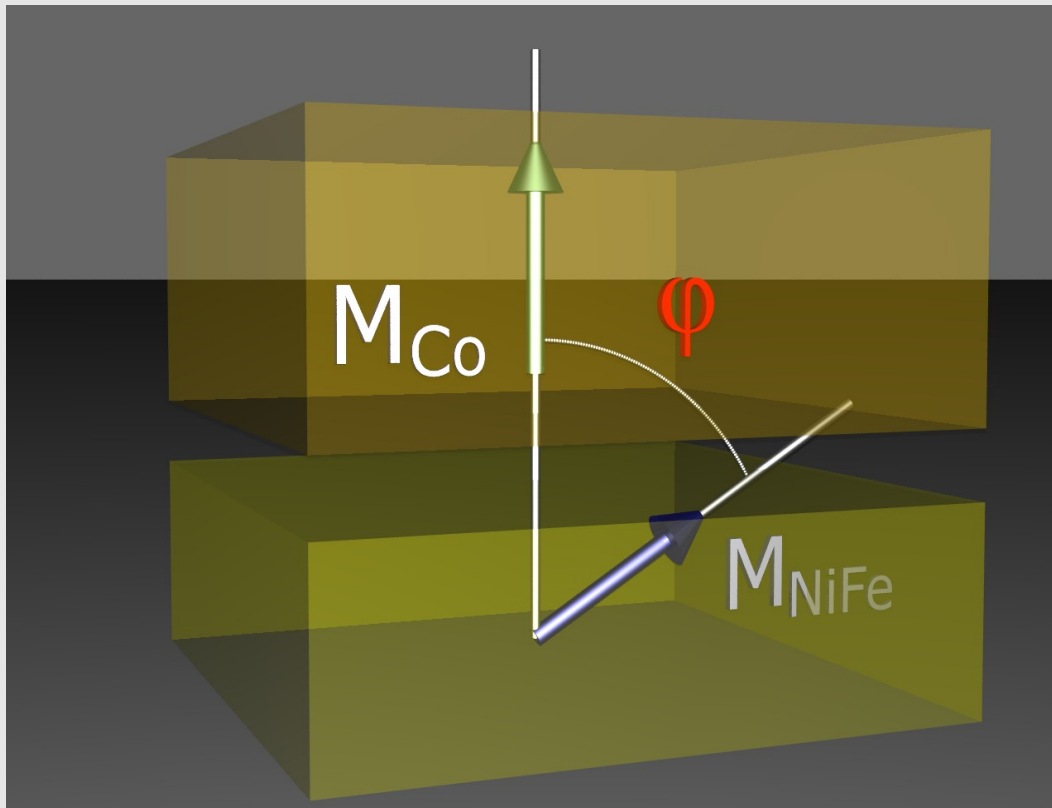
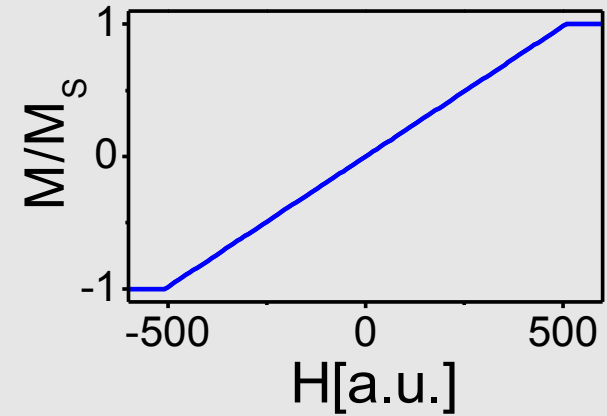
W zależnościach $R(H)$ występują lokalne minima oporu.

Pole nukleacji (kreacji struktury domenowej) oraz anihilacji (nasycenia) dla warstw Co jest widoczne w zależnościach $R(H)$ i $M(H)$.

Gigantyczny Magnetoopór (GMR) - model



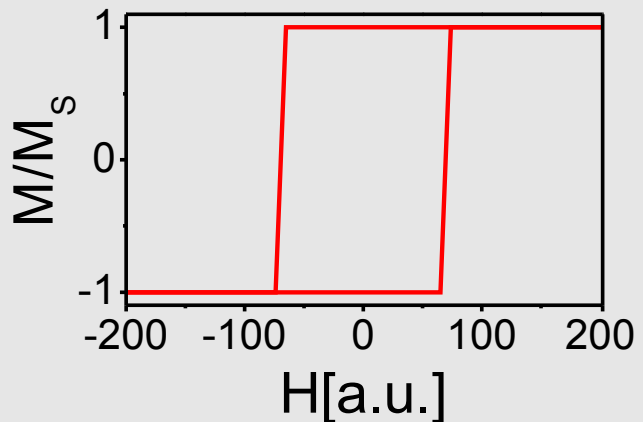
$$\Delta R \propto \cos(\varphi)$$



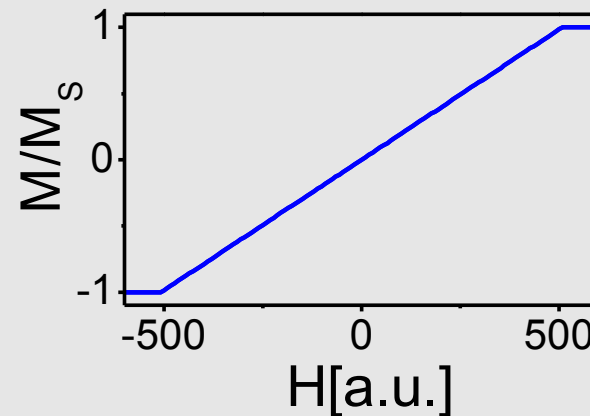
Założenia:

- momenty warstw Co są prostopadłe do płaszczyzny warstwy
- warstw NiFe-anizotropia typu łatwa płaszczyzna
- pole magnetyczne prostopadłe do płaszczyzny warstwy

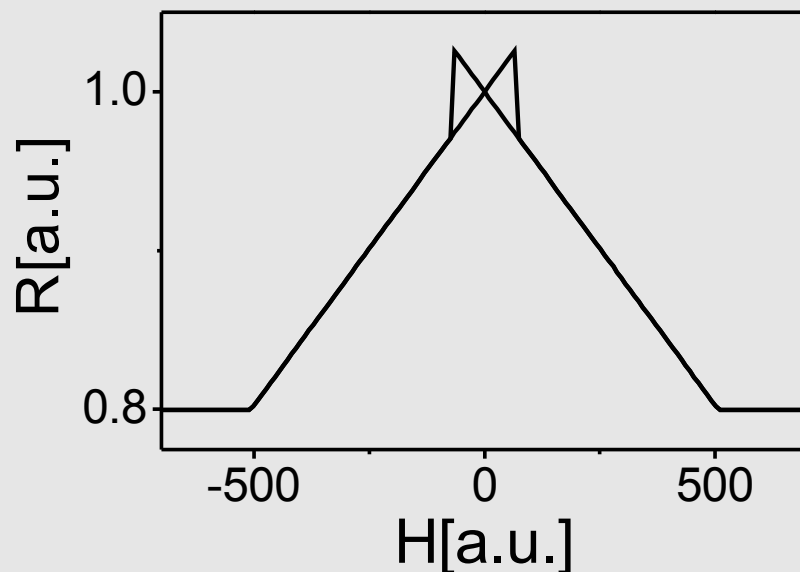
Gigantyczny Magnetoopór (GMR) - model



$$\Delta R \propto \cos(\varphi)$$

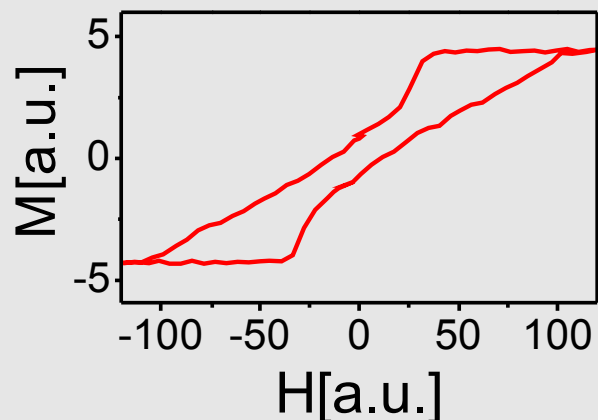


$$R(H) = a(R_0 - \Delta R \cdot \cos(\varphi)) + (1-a)(R_0 + \Delta R \cdot \cos(\varphi))$$

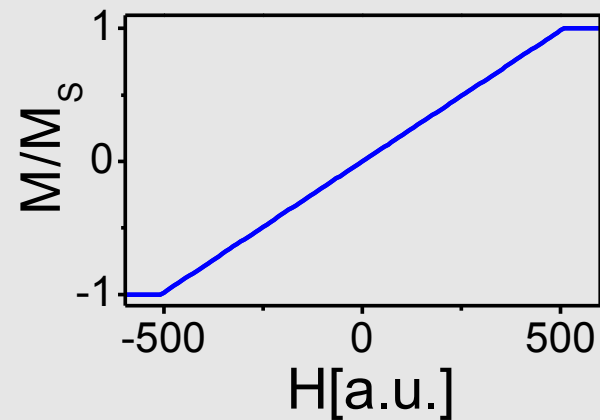


$$a(H) = \frac{1}{2} \left(\frac{M^{Co}(H)}{M_S^{Co}} + 1 \right)$$

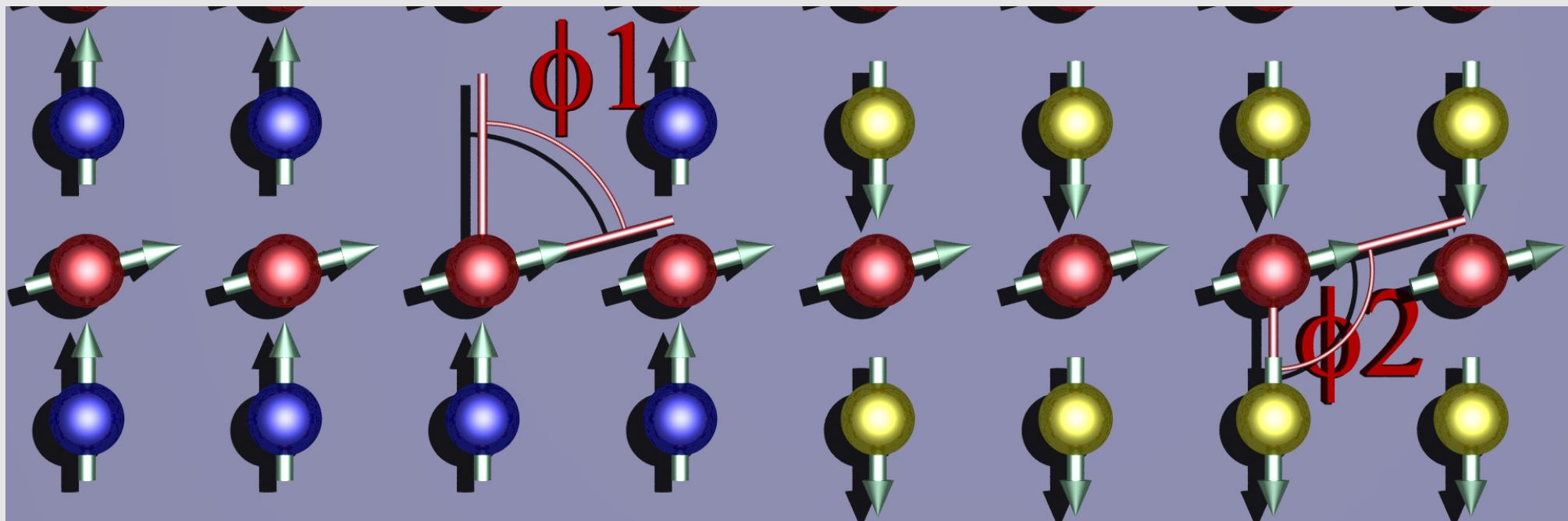
Gigantyczny Magnetoopór (GMR) - model



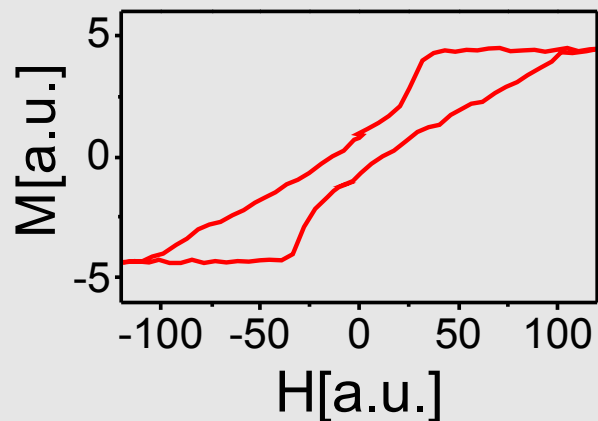
$$\Delta R \propto \cos(\varphi)$$



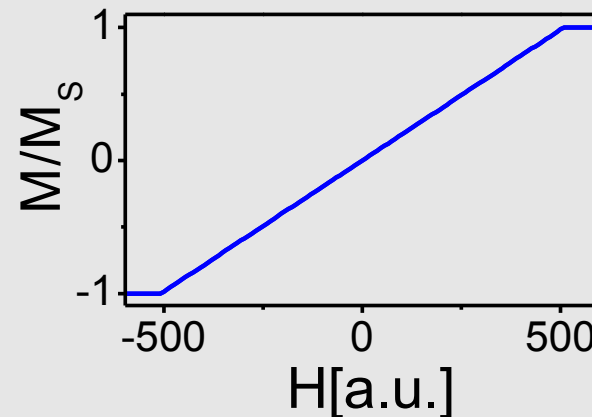
$$R(H) = a(R_0 - \Delta R \cdot \cos(\varphi)) + (1-a)(R_0 + \Delta R \cdot \cos(\varphi))$$



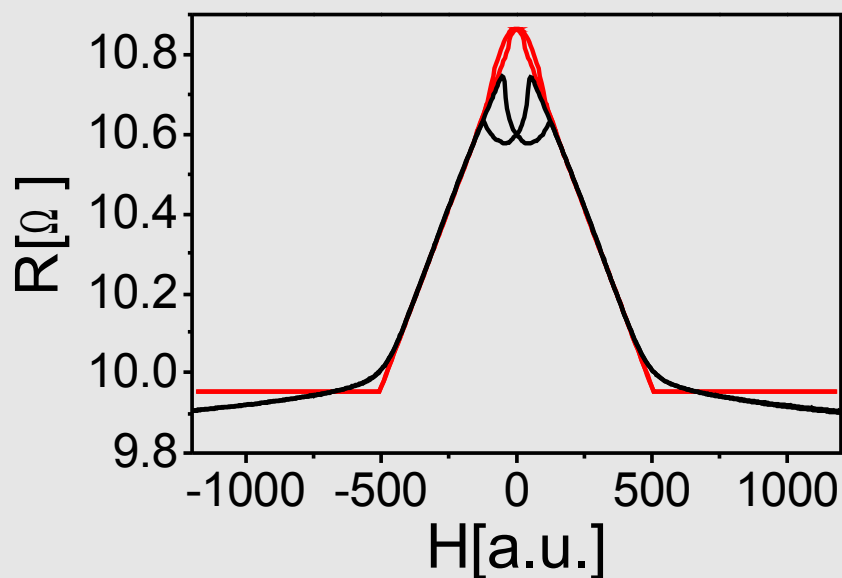
Gigantyczny Magnetoopór (GMR) - model



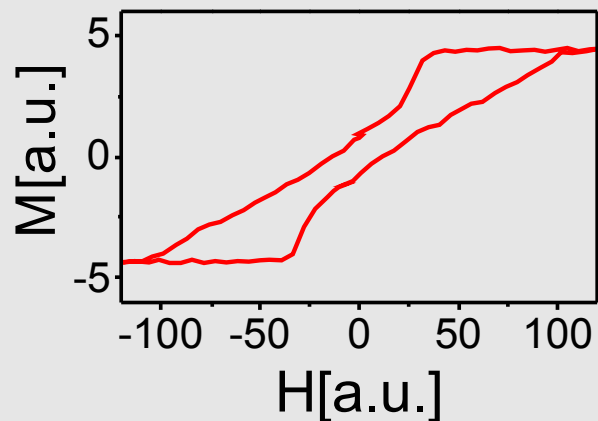
$$\Delta R \propto \cos(\varphi)$$



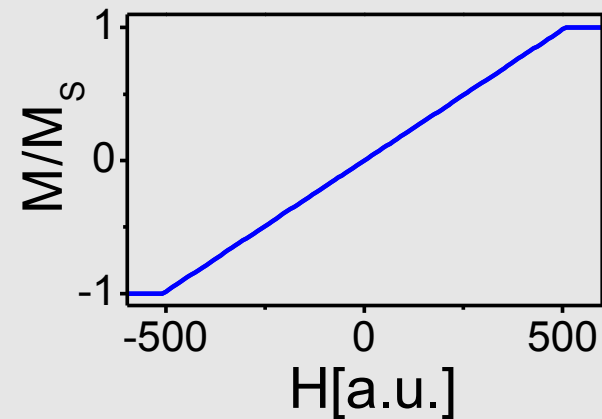
$$R(H) = a(R_0 - \Delta R \cdot \cos(\varphi)) + (1-a)(R_0 + \Delta R \cdot \cos(\varphi))$$



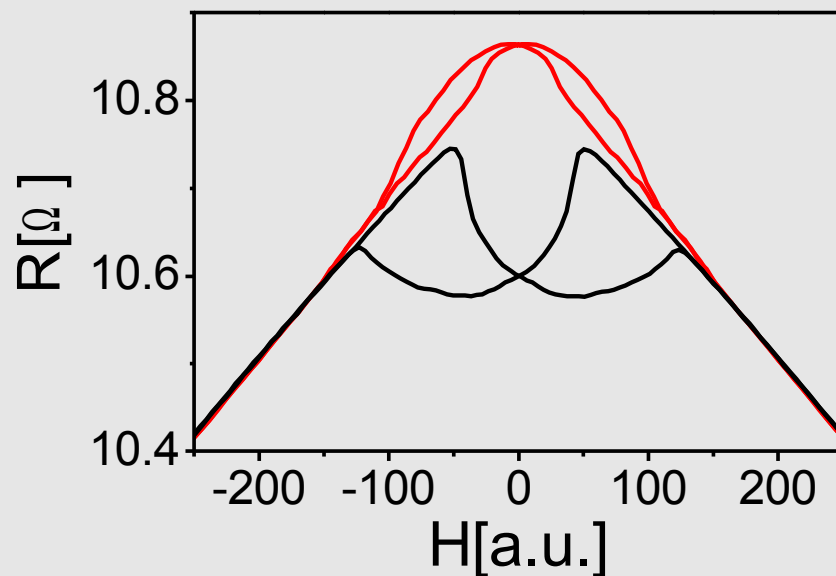
Gigantyczny Magnetoopór (GMR) - model



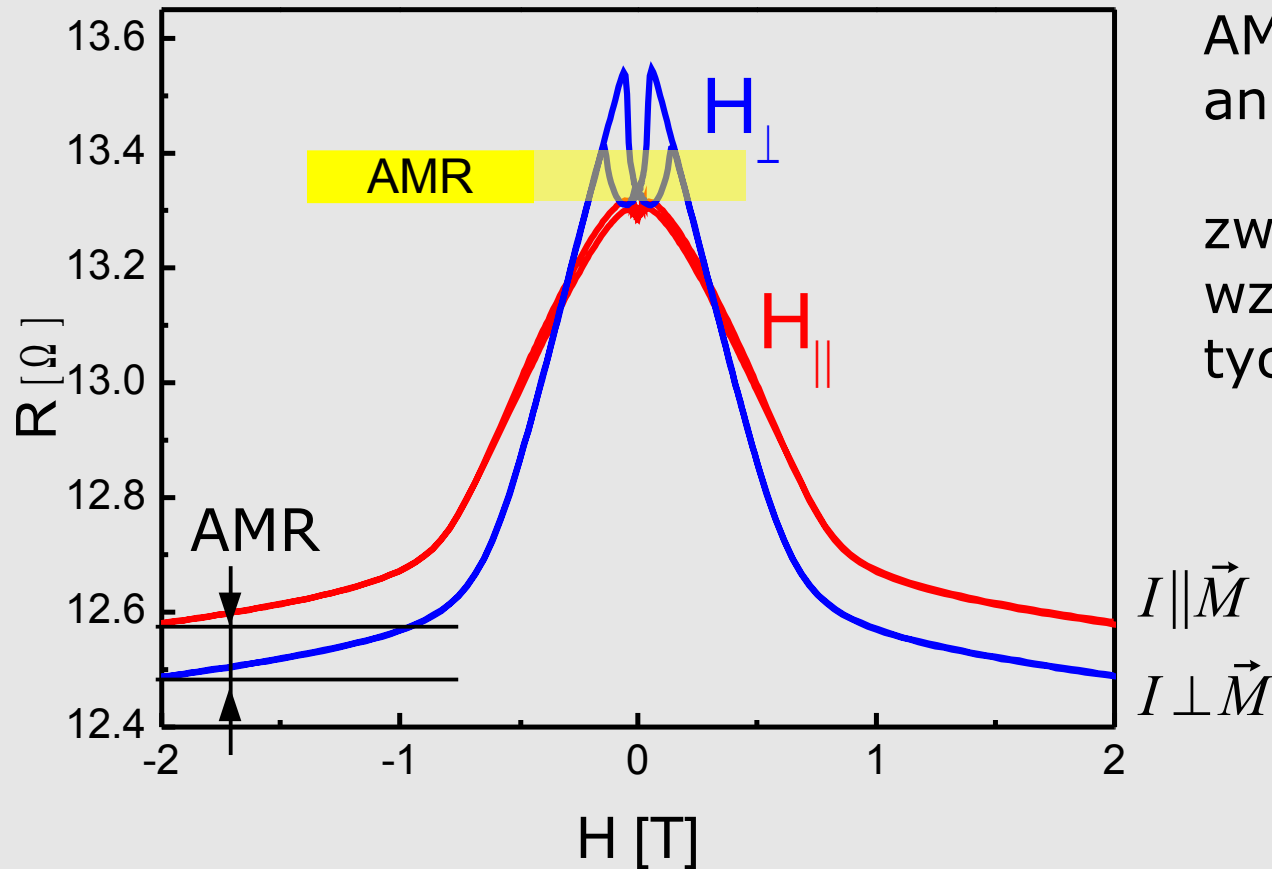
$$\Delta R \propto \cos(\varphi)$$



Niezależne przemagnesowanie warstw Co i NiFe nie prowadzi do występowania lokalnego minimum oporu



Gigantyczny Magnetoopór (GMR) – wpływ AMR?

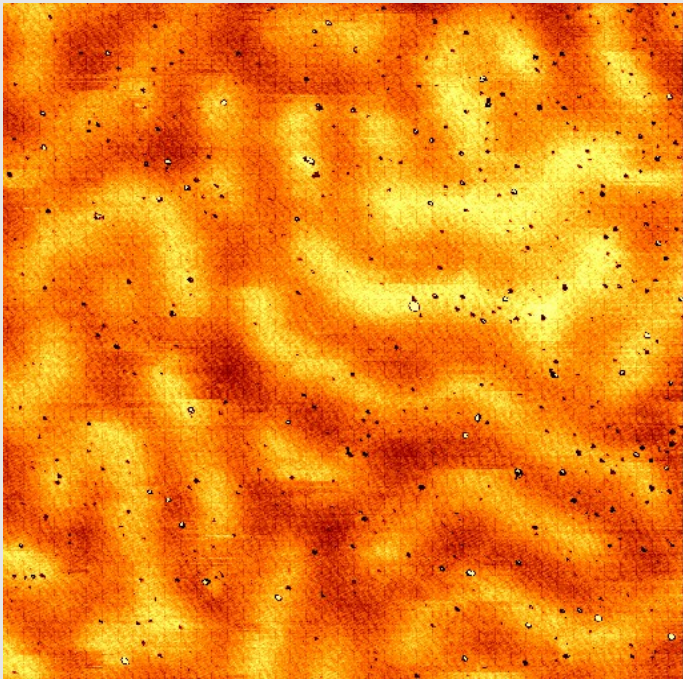


AMR – magnetoopór anizotropowy:

związany z orientacją prądu względem momentu magnetycznego

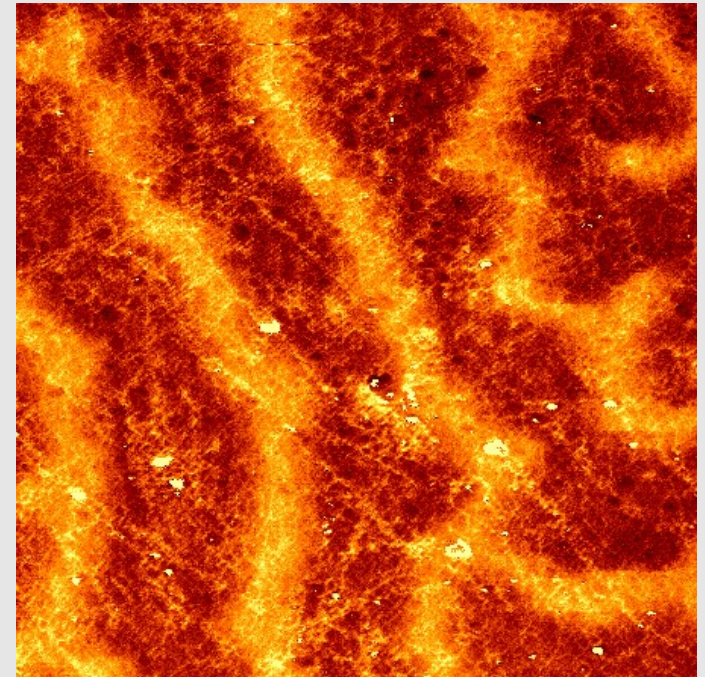
Anizotropowy efekt magnetooporowy jest zbyt słaby by można za jego pomocą tłumaczyć występowanie lokalnych minimów oporu w zależnościach $R(H)$.

Struktura domenowa warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$



$t_{\text{Au}} = 1.5 \text{ nm}$

MFM $3 \times 3 \mu\text{m}^2$

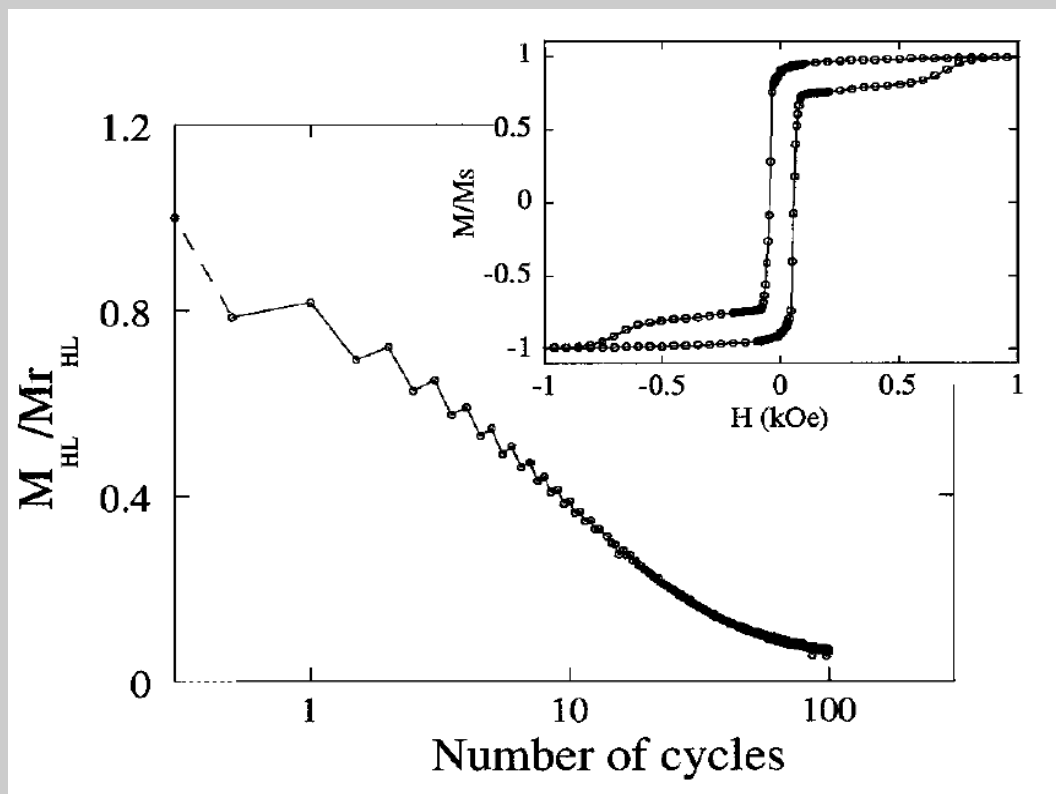


$t_{\text{Au}} = 3 \text{ nm}$

W stanie remanencji struktura pasiasta i labiryntowa

$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(2 \text{ nm})/\text{Au}(t_{\text{Au}})/\text{Co}(0.6 \text{ nm})/\text{Au}(t_{\text{Au}})]_{15}$

Oddziaływania dipolowe w warstwach wielokrotnych



W wyniku przemagnesowania warstwy CoFe przemagnesowaniu ulega np. 10% ziaren CoPtCr o namagnesowaniu przeciwnym do kierunku pola.

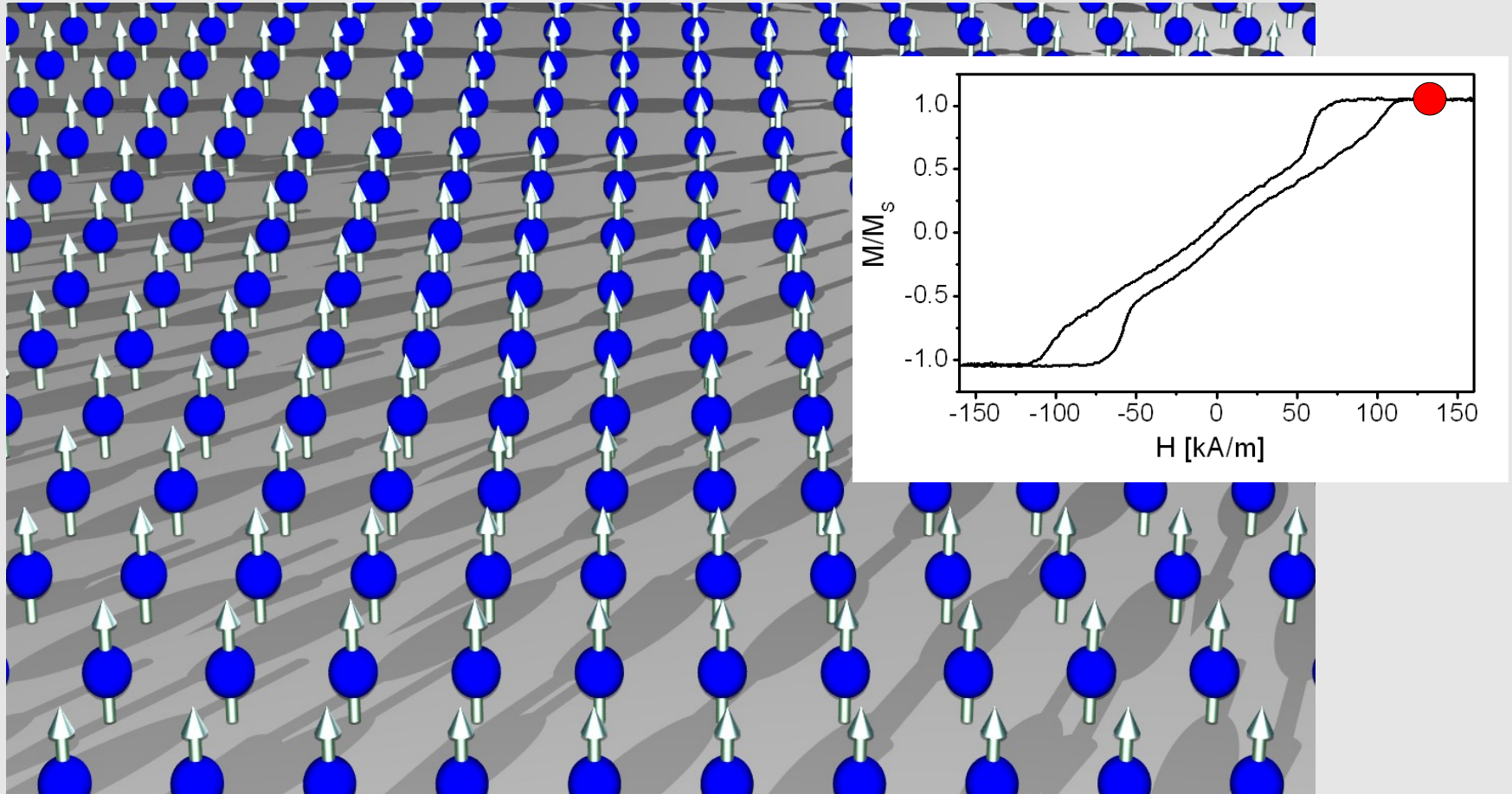
$$H_{\text{przemienne}} \ll H_{\text{koercji warstwy twardej}}$$

L. Thomas et al.,
Phys. Rev. Lett. **84**, 3462 (2000)

N_c indeksowane co pół cyklu \Rightarrow
poszczególne przełączania CoFe

Si(100)/SiO₂/Co₈₄Fe₁₆(10nm)/Cr(1.5nm)/Co₇₅Pt₁₂Cr₁₃(5nm)/Al(1.5nm)

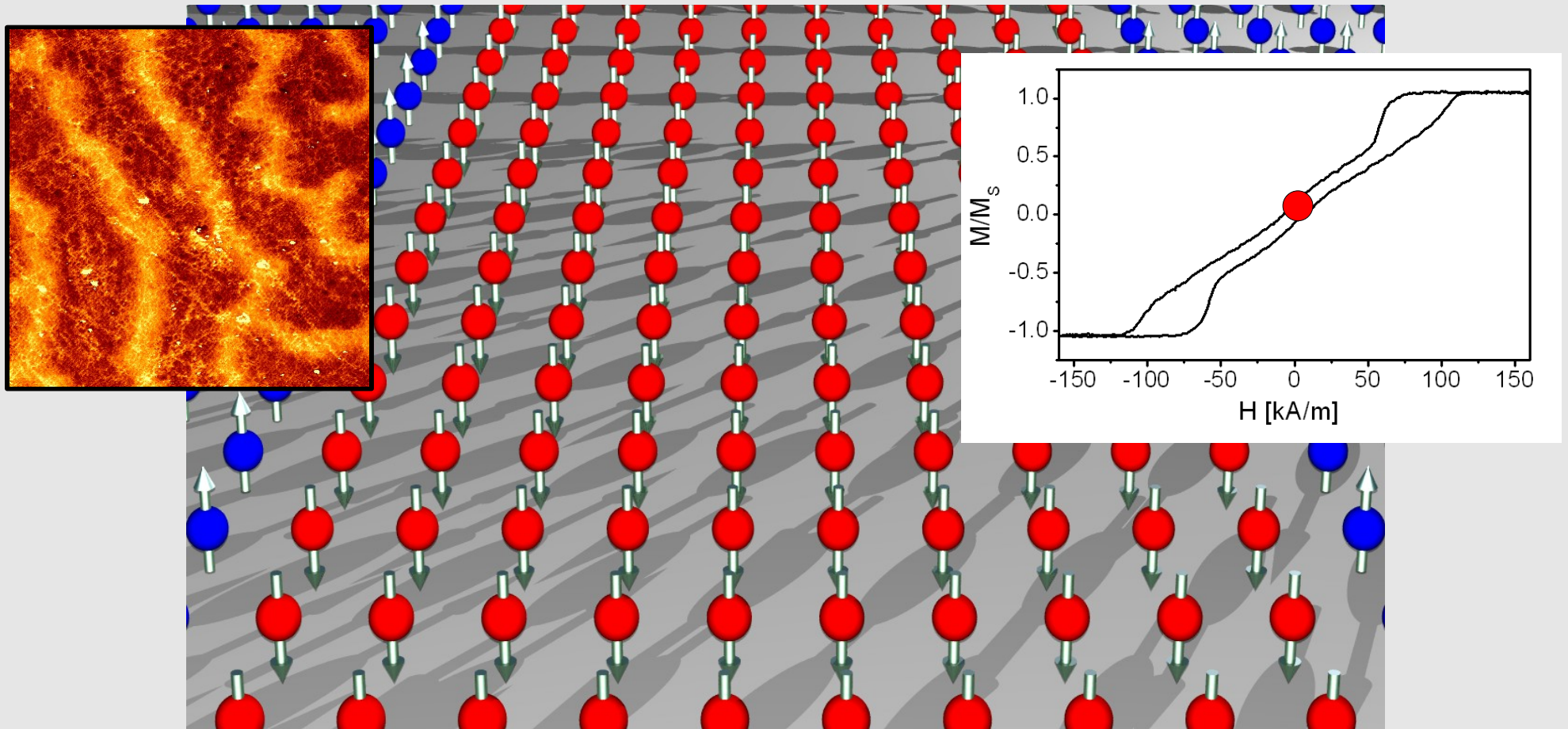
Struktura domenowa warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$



$H \geq H_N$:

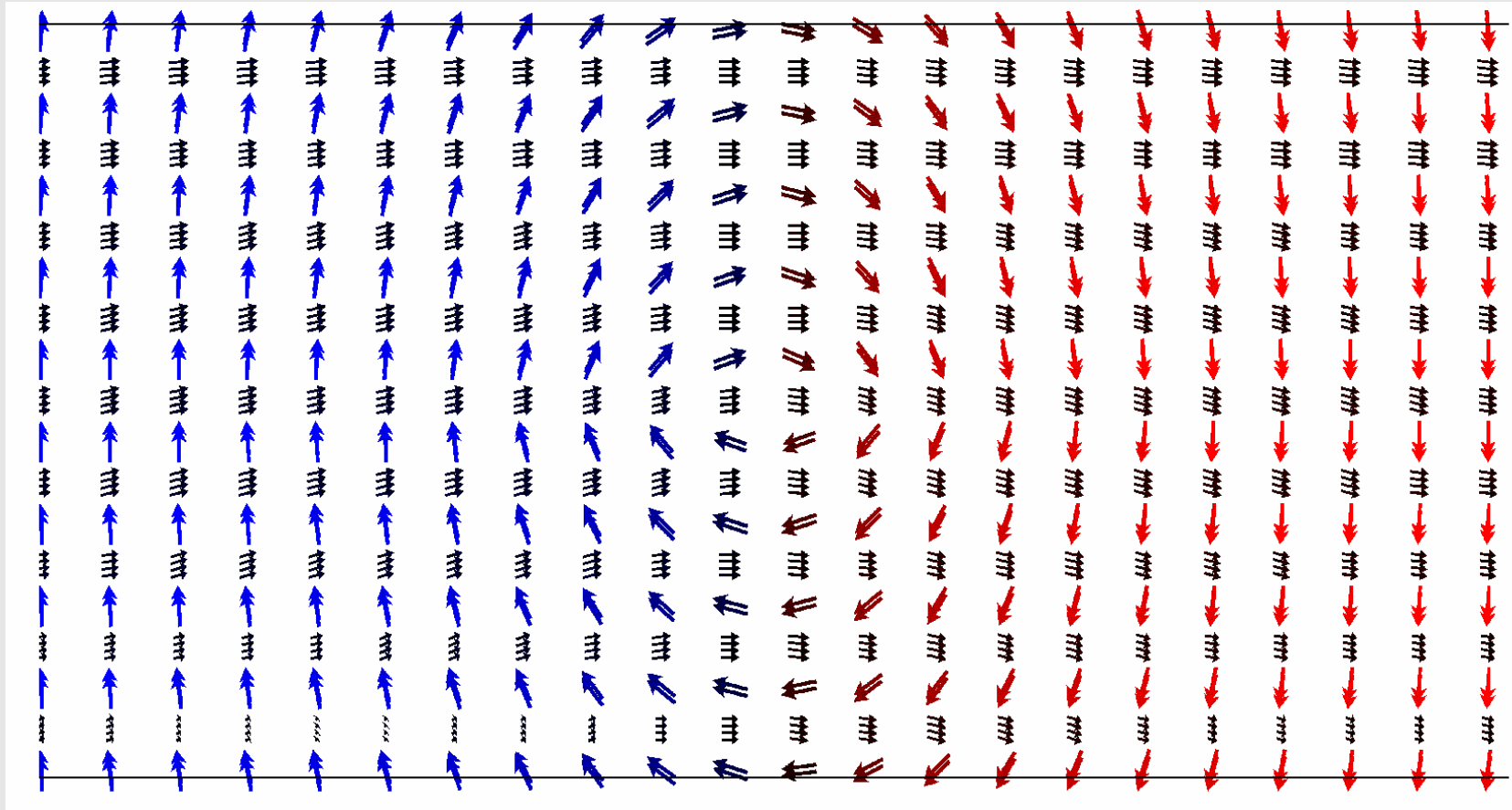
- brak struktury domenowej
- zaniedbywalne pola magnetostaticzne

Struktura domenowa warstw $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$



W stanie remanencji struktura pasiasta i labiryntowa oraz silne pola magnetostaticzne.

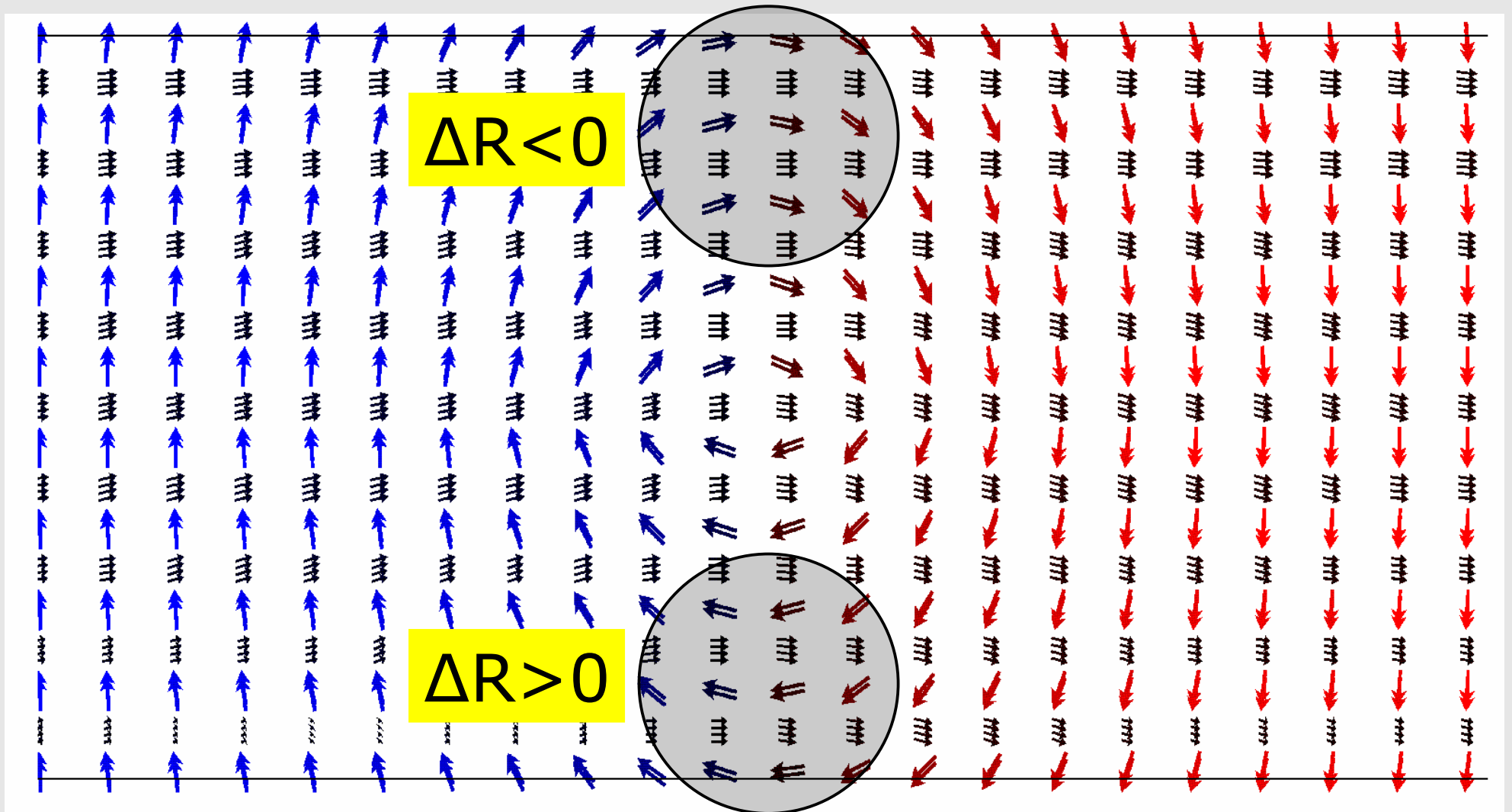
Struktura domenowa - symulacja*



$$H=0$$

*Simulation with free oommf package from NIST; $(1 \times 1 \mu\text{m}^2) \times 55\text{nm}$;
Co domains 200 nm wide; $\alpha=0.5$; regular mesh with cell size of
 $(5 \times 0.5 \times 50\text{nm}^3)$; stiffness: Co: $30\text{e-}12 \text{ J/m}$, Py: $13\text{e-}12 \text{ J/m}$

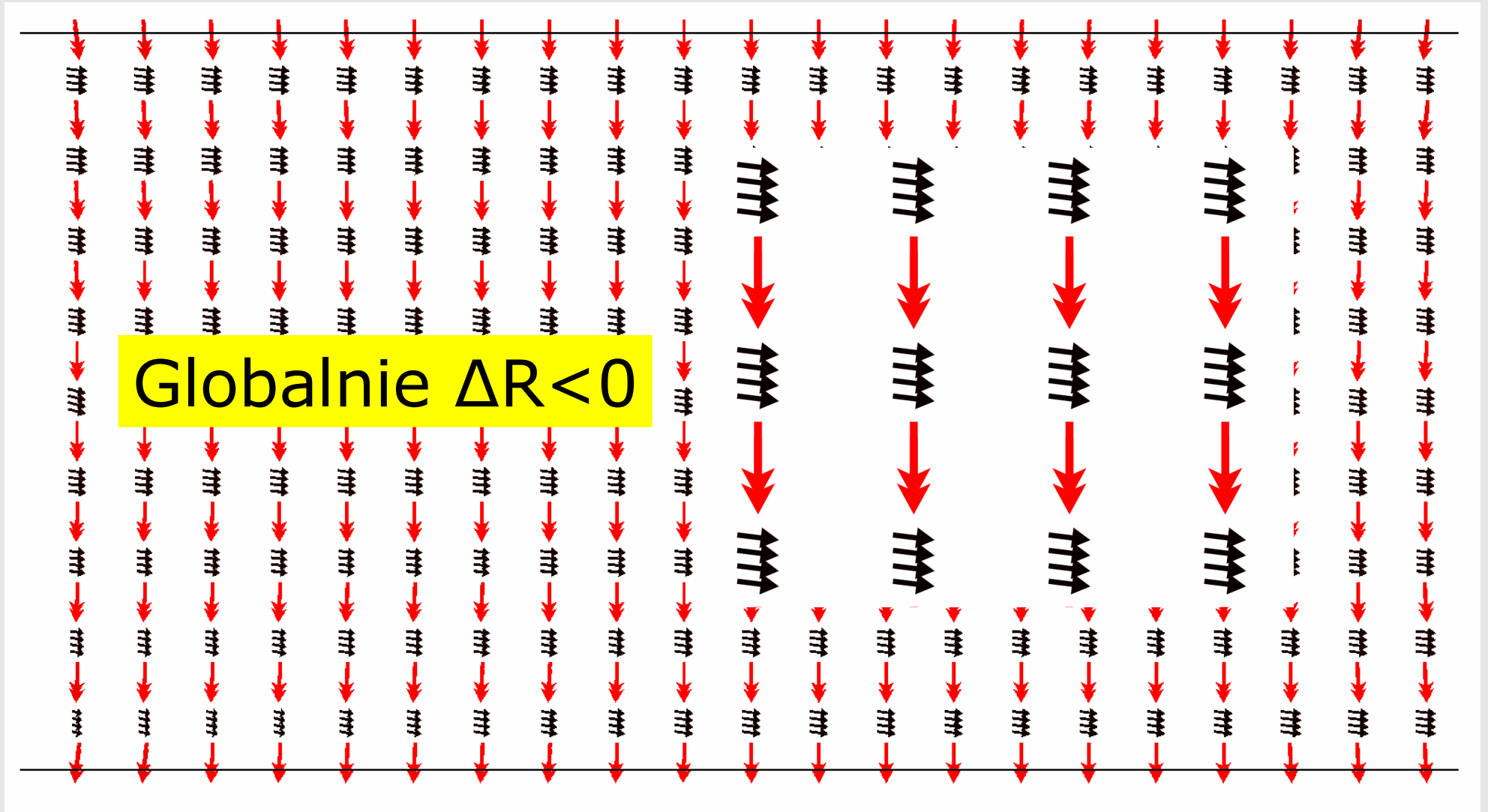
Struktura domenowa - symulacja*



$$\Delta R \propto \cos(\varphi)$$

$$H=0$$

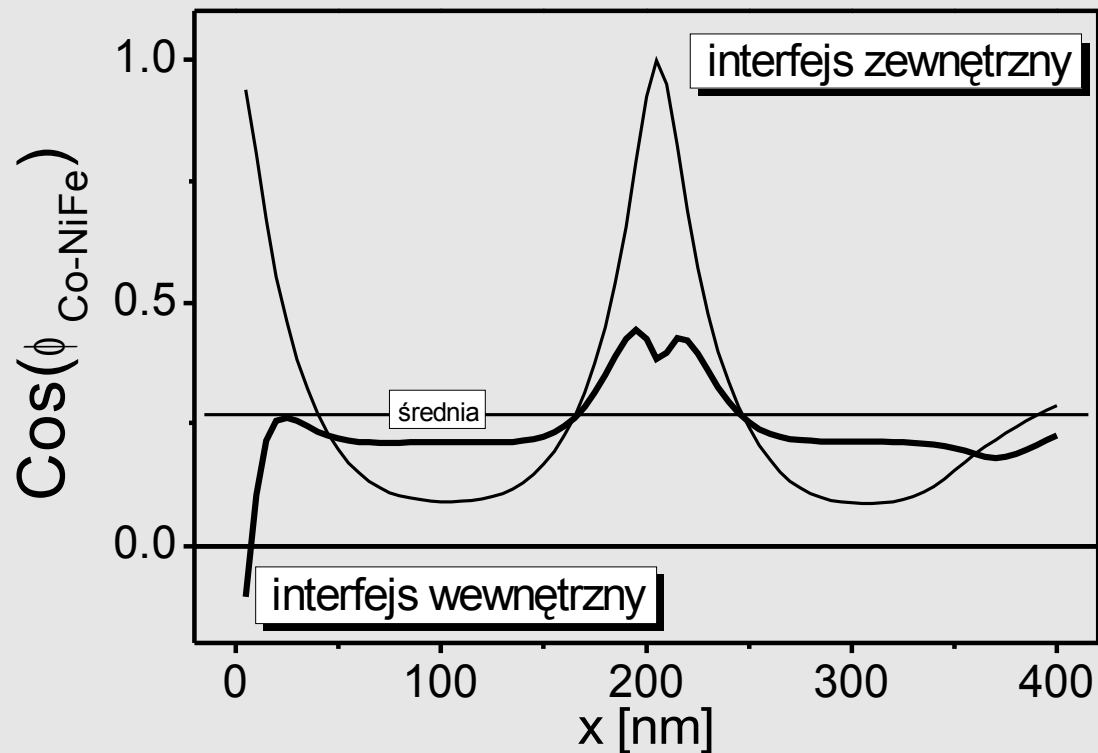
Struktura domenowa - symulacja*



$$\Delta R \propto \cos(\varphi)$$

$$H=0$$

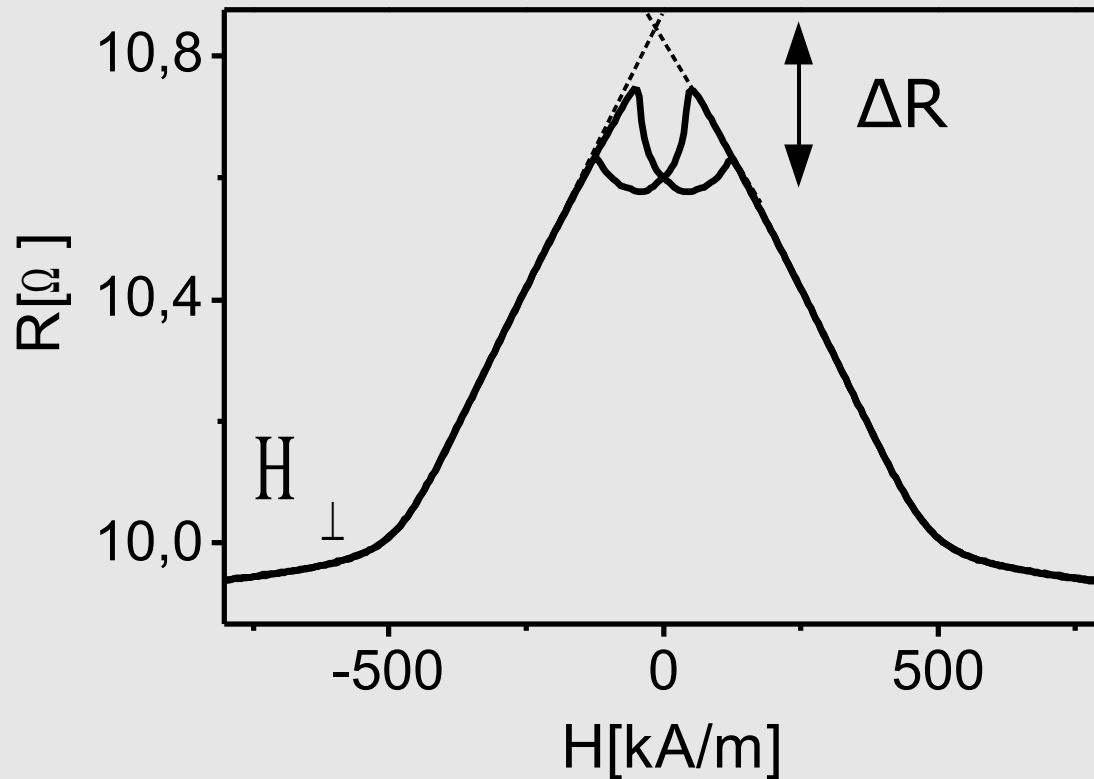
Struktura domenowa - symulacja*



$$\Delta \cos(\varphi) = 0.265$$

W wyniku oddziaływań magnetostacyjnych między warstwami Co i NiFe zwiększeniu ulega średnia wartość kosinus kąta między momentami magnetycznymi sąsiednich warstw \Rightarrow spadek oporu.

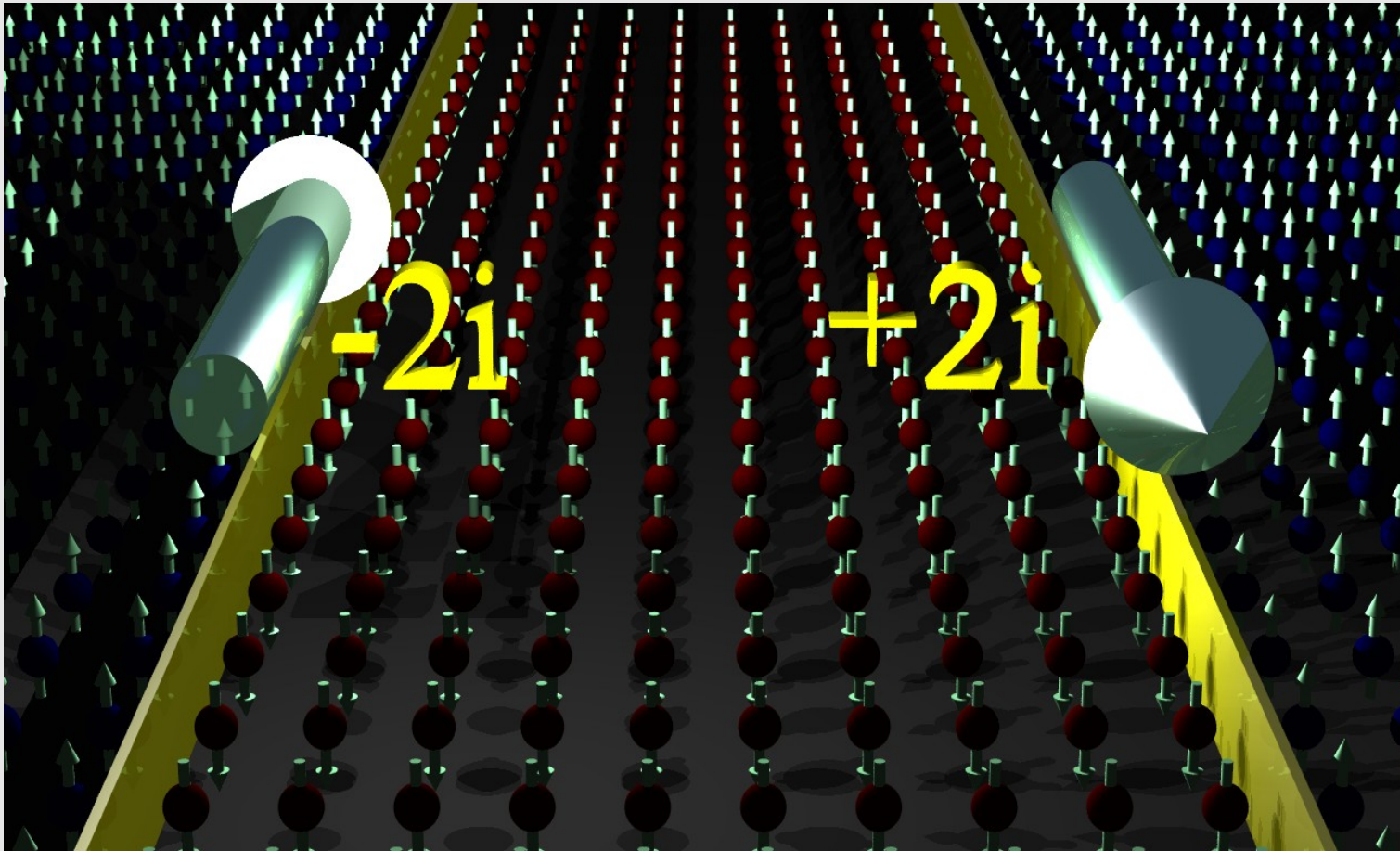
Struktura domenowa - symulacja*



$$\Delta \cos(\varphi) = 0.265$$

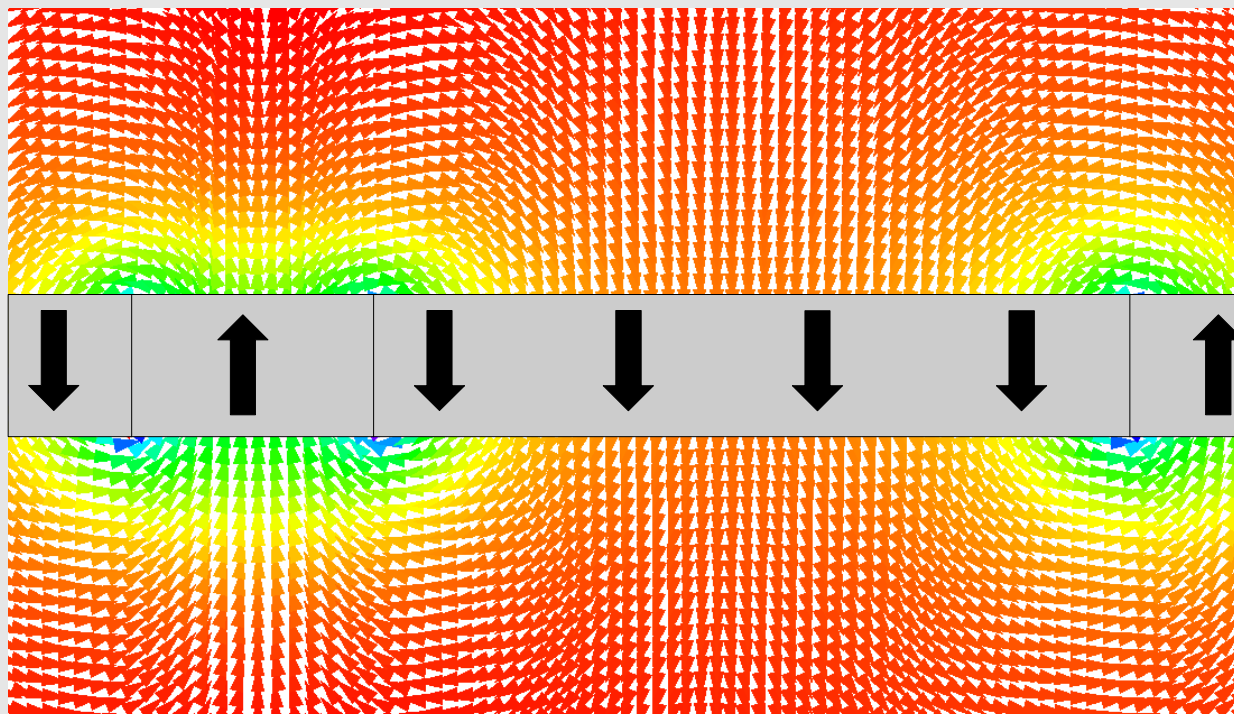
W wyniku oddziaływań magnetostacyjnych między warstwami Co i NiFe zwiększeniu ulega średnia wartość kosinus kąta między momentami magnetycznymi sąsiednich warstw \Rightarrow spadek oporu.

Pola magnetostaticzne w warstwach $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$

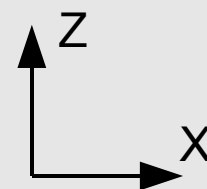


Ze względu na stosunkowo małą szerokość ścian domenowych można je przybliżyć „paskami prądowymi”.

Pola magnetostaticzne w warstwach [NiFe/Au/Co/Au]_N



- Nieskończenie długie domeny (kierunek y)
- zerowa szerokość ścian domenowych
- Biot-Savart

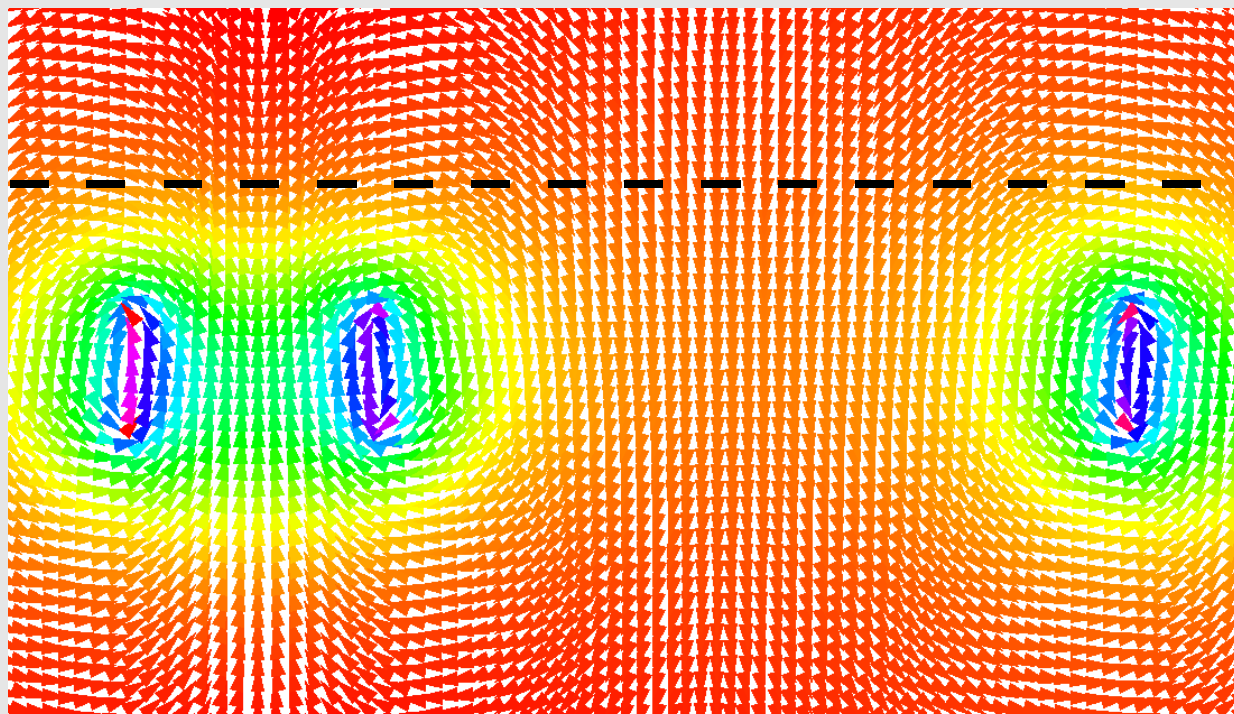


$$H_z = \frac{M_S^{Co}}{2\pi} \arctan\left(\frac{z_2 - z}{x_2 - x_1}\right) \Bigg|_{z_0}^{z_3}$$

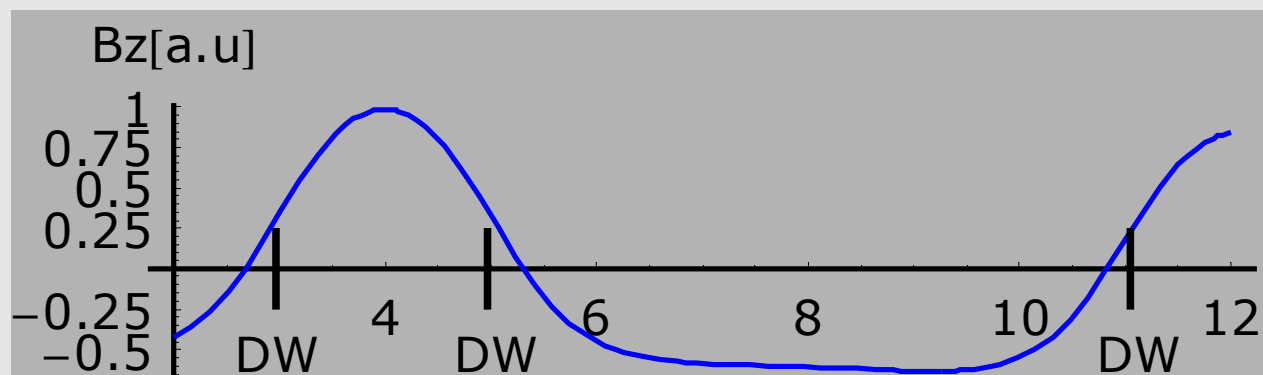
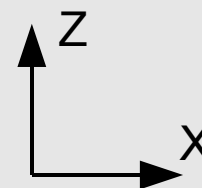
$$H_x = \frac{M_S^{Co}}{2\pi} \ln\left[\frac{(x_2 - x_1)^2 - (z_2 - z)^2}{(x_2 - x_1)^2 - (z_2 - z_0)^2}\right] \Bigg|_{z_0}^{z_3}$$

Pole magnetyczne domen silnie zależy od stosunku szerokość/grubość

Pola magnetostaticzne w warstwach [NiFe/Au/Co/Au]_N

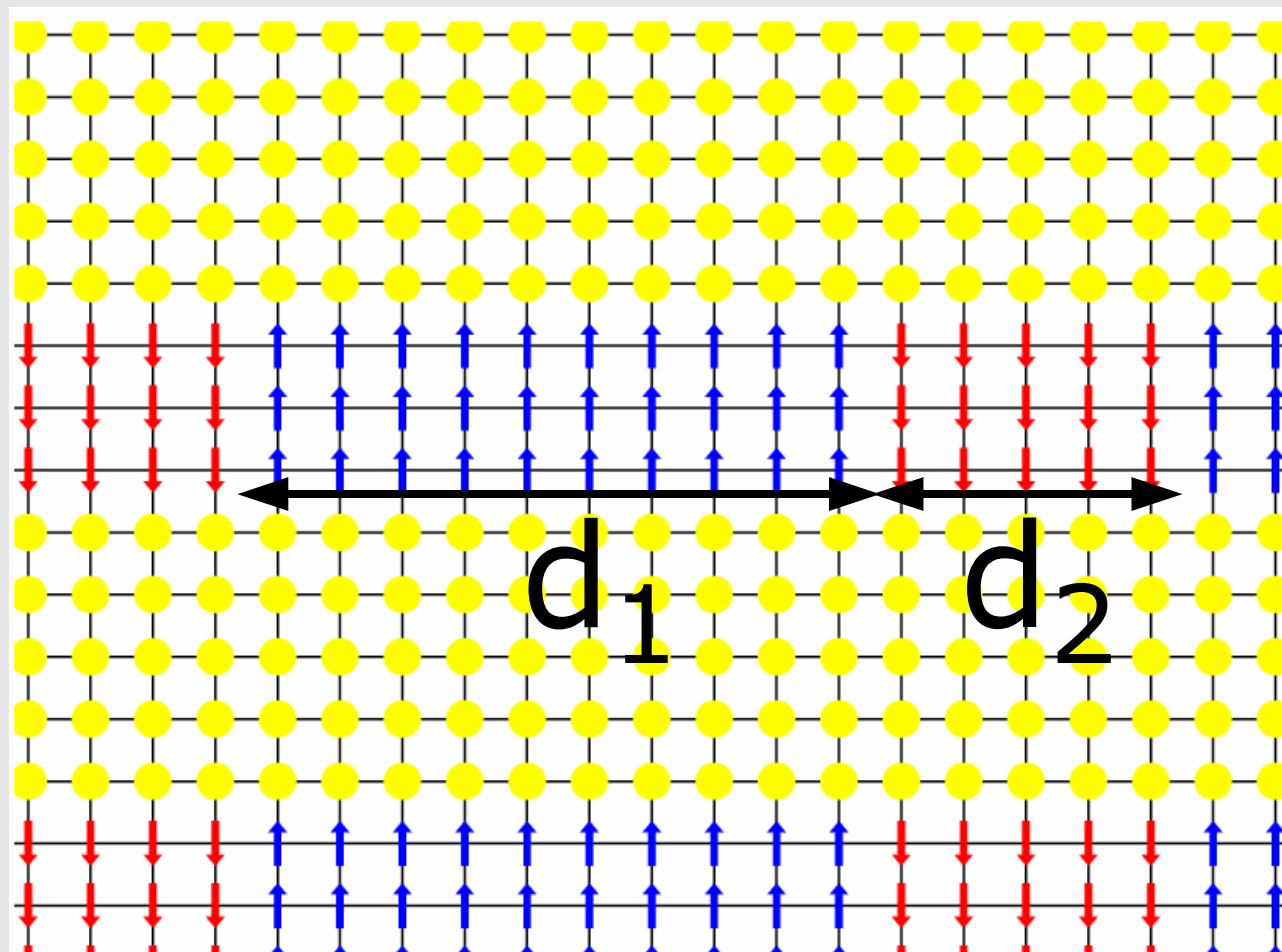


Położenie warstwy
miękkiej (NiFe)

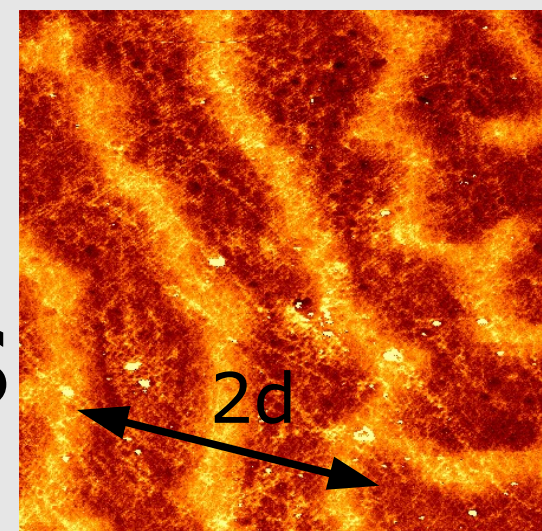


DW-ściana domenowa

Pola magnetyczne w warstwach [NiFe/Au/Co/Au]_N



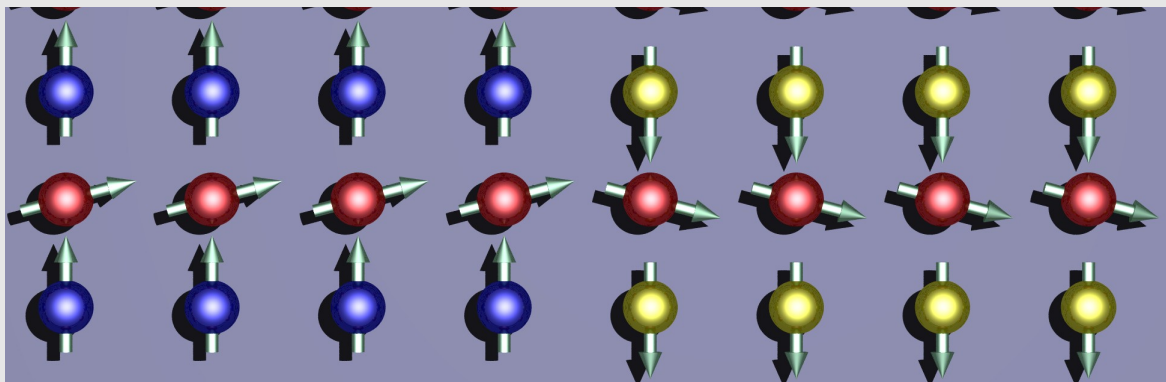
model
Draaisma, de Jonge



Model ten opisuje warstwy wielokrotne bez warstw z anizotropią w płaszczyźnie

$$d = d_1 + d_2$$

Pola magnetostaticzne w warstwach [NiFe/Au/Co/Au]_N



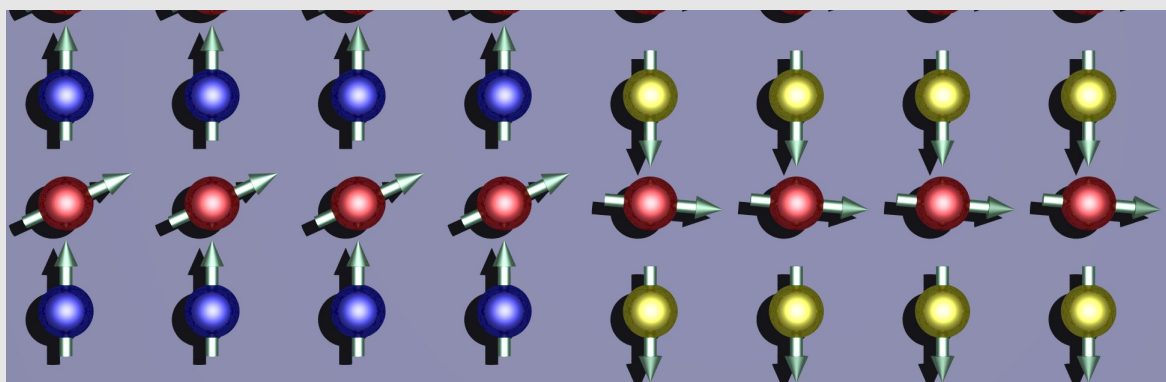
$$H = H_d$$

Założenie:

stała wymiany NiFe = 0!

$$\cos(\varphi_{\uparrow}) = \frac{H_{\text{appl}} + H_d}{M_S^{\text{Co}}}$$

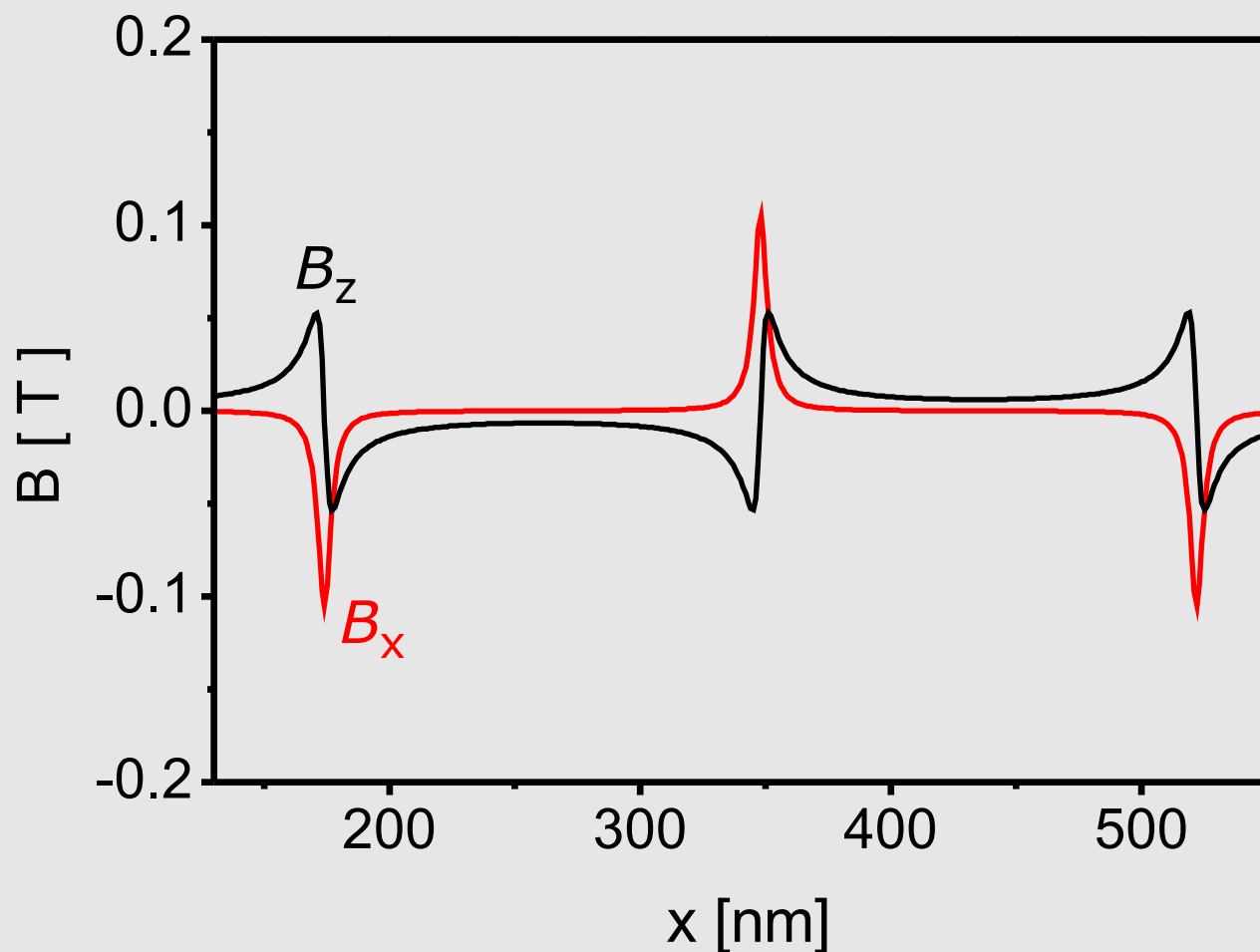
$$\cos(\varphi_{\downarrow}) = \frac{H_{\text{appl}} - H_d}{M_S^{\text{Co}}}$$



$$H = H_d + H_{\text{appl}}$$

↑
 H_{appl}

Pola magnetostaticzne w warstwach $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$



Model:

szerokość domen: 174 nm

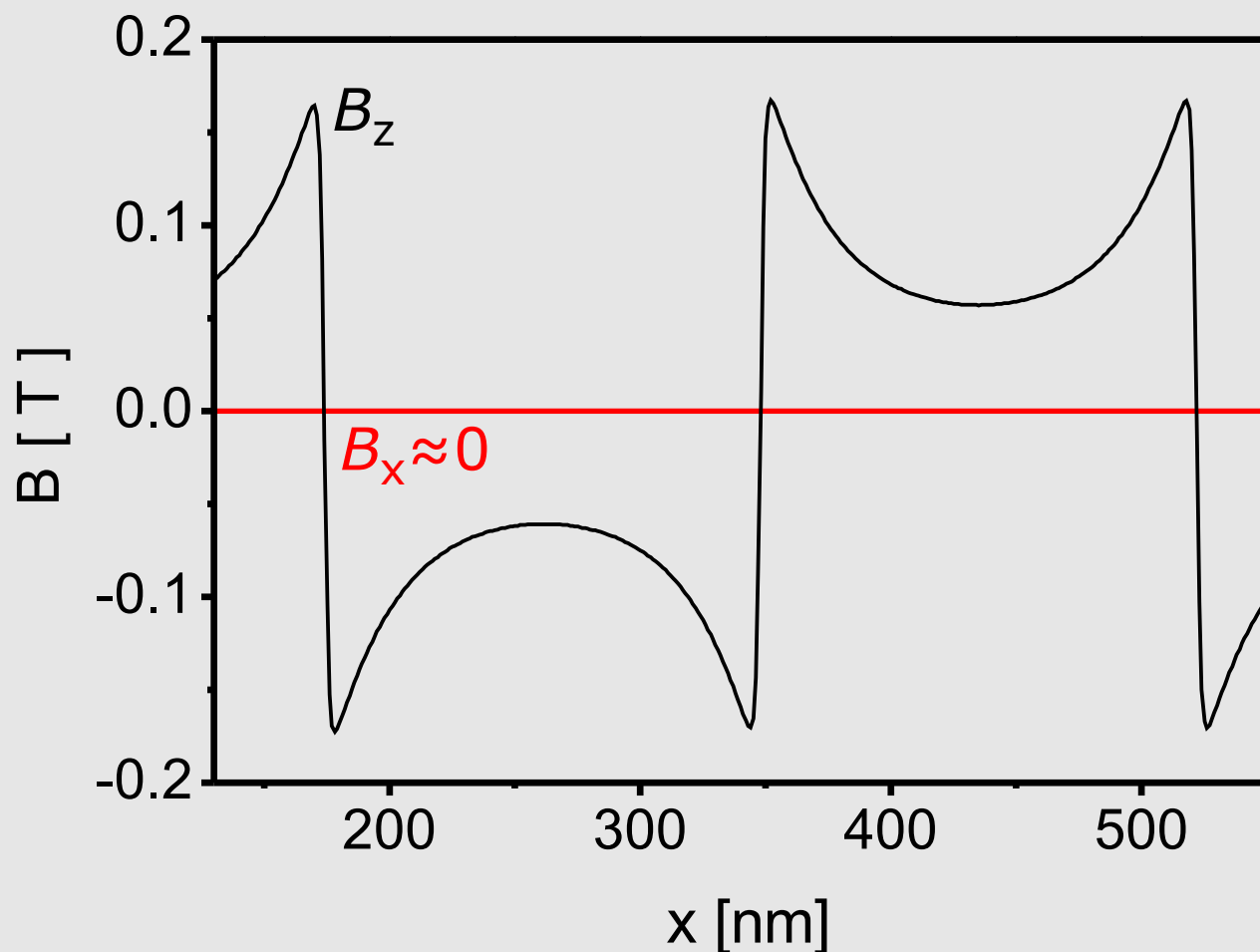
$t_{\text{Co}} = 0.6$ nm

Pole 3 nm nad warstwą Co

1 warstwa Co

W warstwach wielokrotnych można zaniedbać wpływ składowej pola magnetostaticznego warstw Co leżącej w płaszczyźnie warstw NiFe.

Pola magnetostaticzne w warstwach [NiFe/Au/Co/Au]_N



Model:

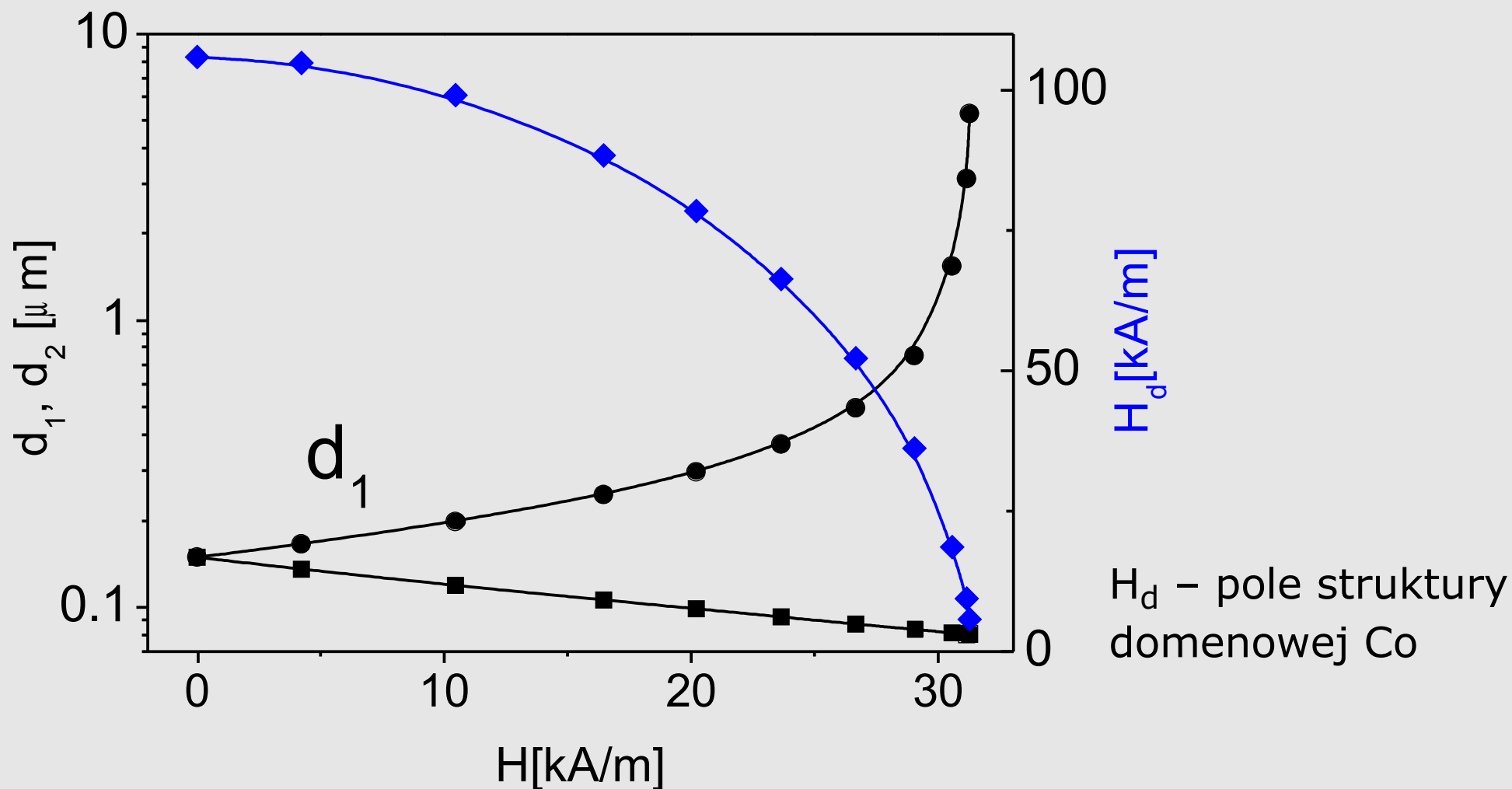
szerokość domen: 174 nm

$t_{Co} = 0.6$ nm

10 warstw Co

W warstwach wielokrotnych można zaniedbać wpływ składowej pola magnetostaticznego warstw Co leżącej w płaszczyźnie warstw NiFe ($B_x \approx 0$).

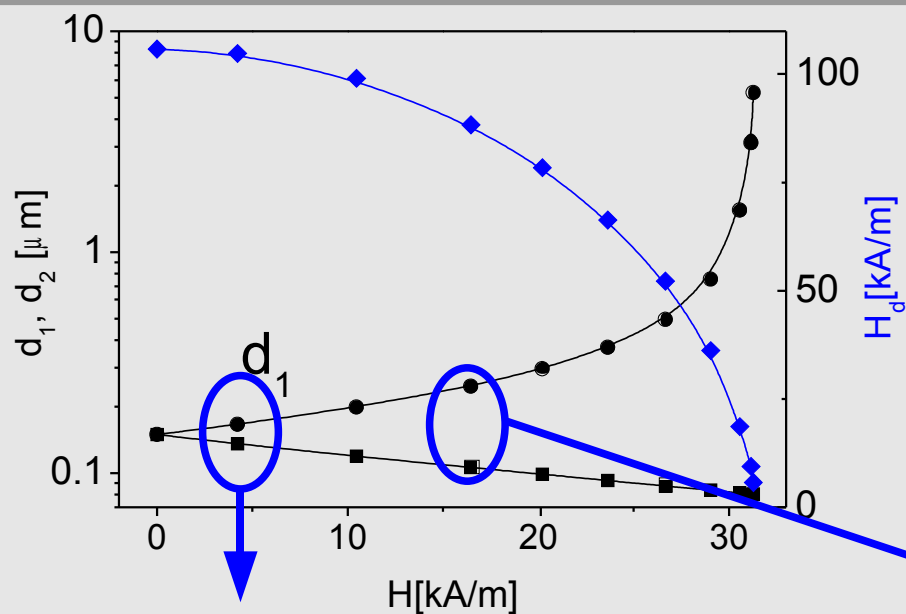
Pola magnetostatyczne w warstwach $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$



Parametr energii ściany domenowej $\tau=2.9$ nm (Draaisma Co/Pt $\tau=0.8$ nm)

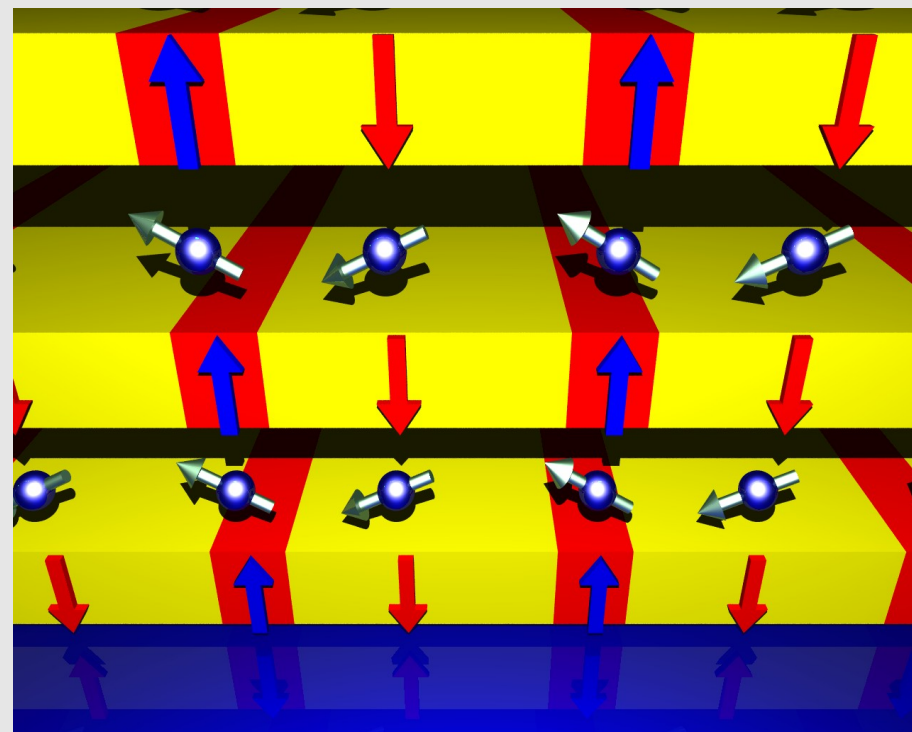
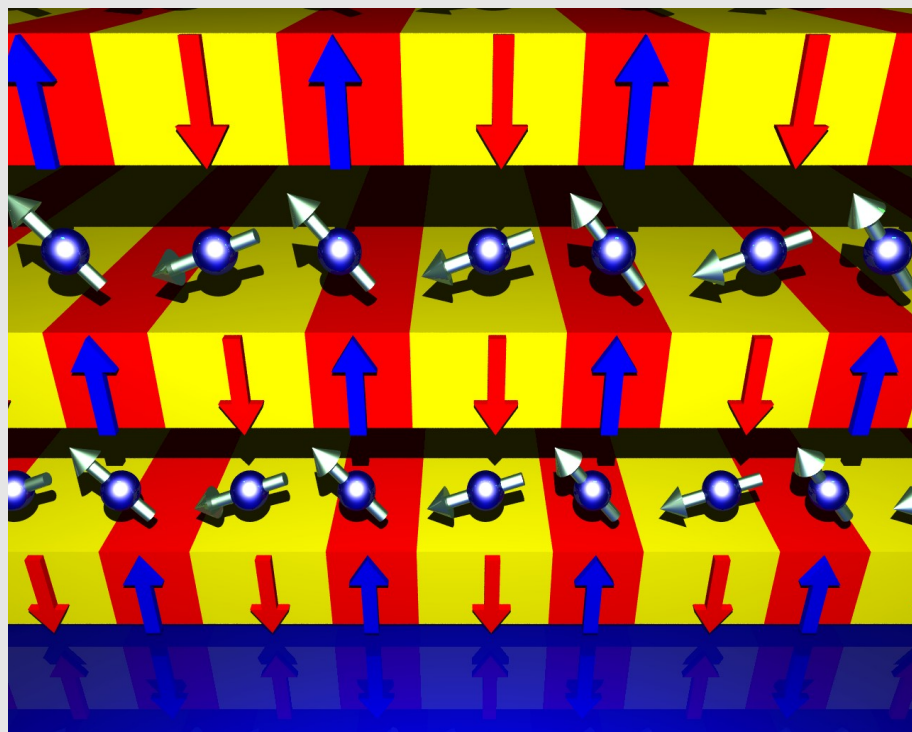
$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(2 \text{ nm})/\text{Au}(1.5 \text{ nm})/\text{Co}(0.8 \text{ nm})/\text{Au}(1.5 \text{ nm})]_{10}$

Pola magnetyczne w warstwach [NiFe/Au/Co/Au]_N

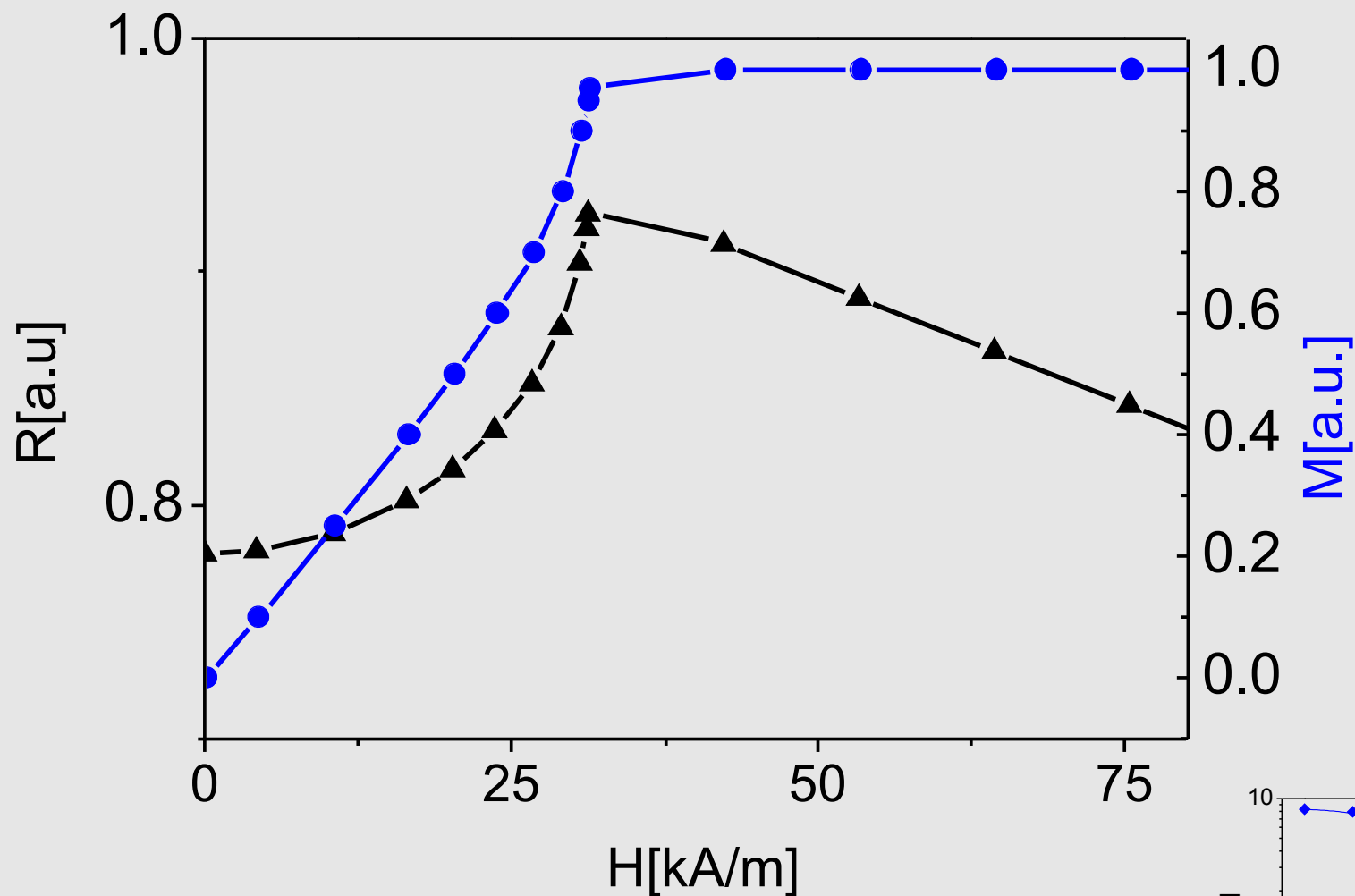


$$R(H) =$$

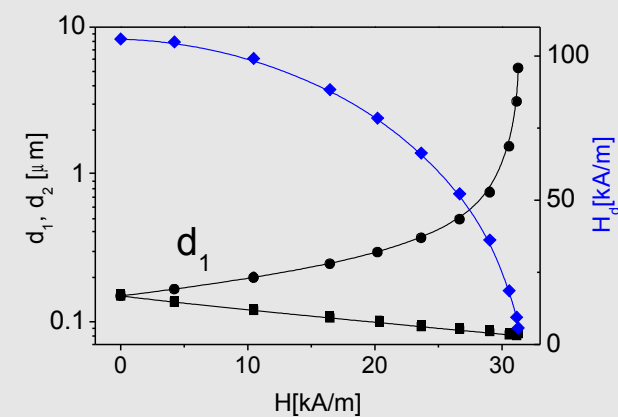
$$r_0 - \frac{dr}{M_S^{\text{NiFe}}} \left[H \frac{M^{\text{Co}}(H)}{M_S^{\text{Co}}} + H_d(H) \right]$$



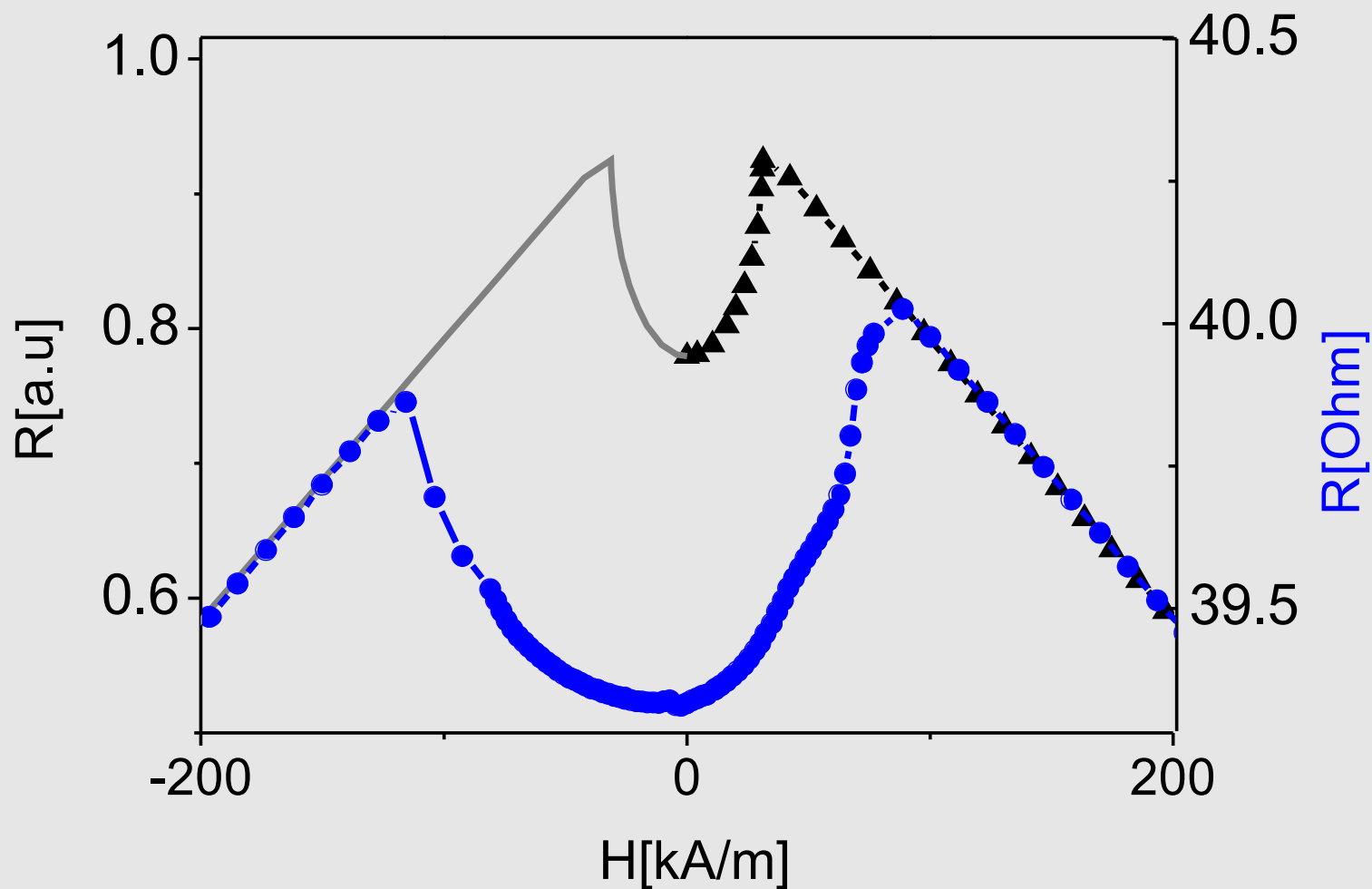
Pola magnetostatyczne w warstwach $[\text{NiFe}/\text{Au}/\text{Co}/\text{Au}]_N$



$[\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}(2 \text{ nm})/\text{Au}(1.5 \text{ nm})/\text{Co}(0.8 \text{ nm})/\text{Au}(1.5 \text{ nm})]_{10}$

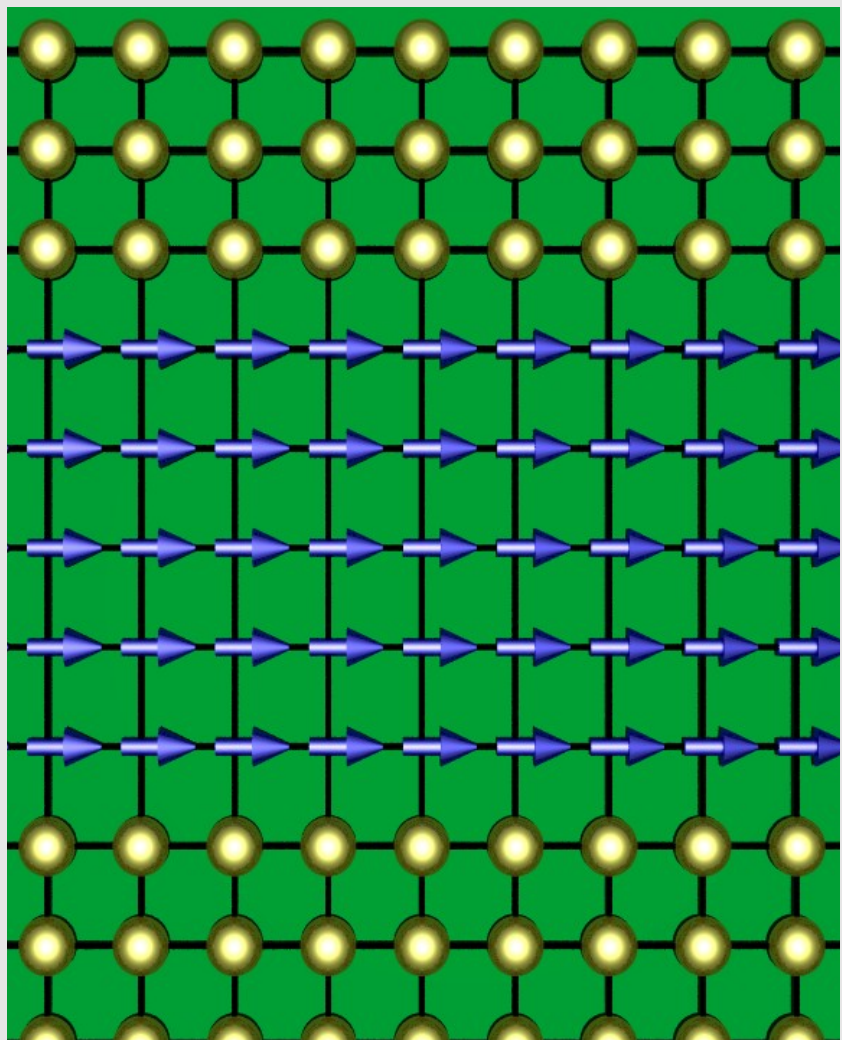


Pola magnetostaticzne w warstwach [NiFe/Au/Co/Au]_N

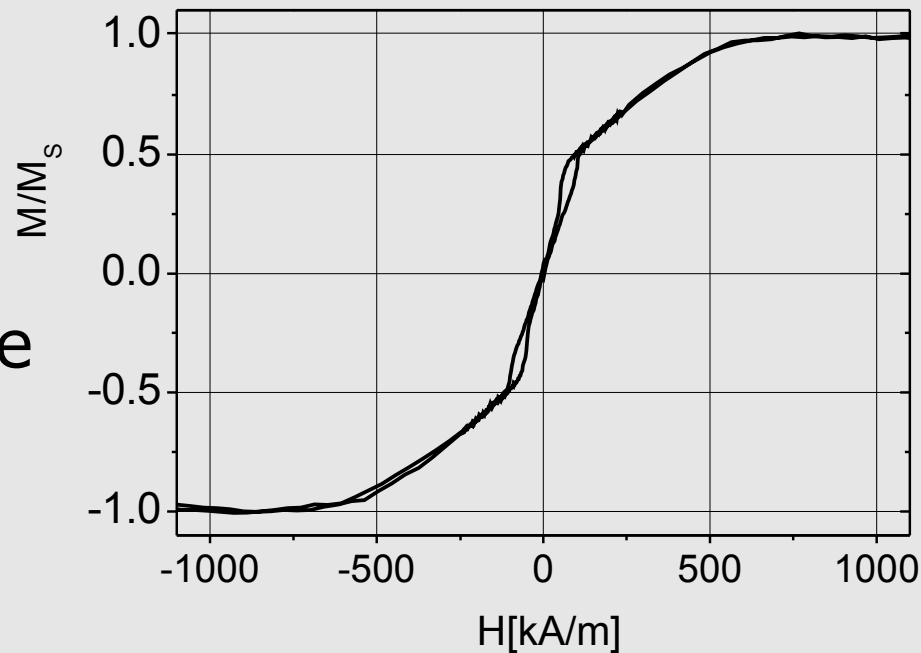


„Modelowa” zależność $R(H)$ jest jakościowo podobna do zależności **eksperymentalnej**. Pola nukleacji i ΔR nie mogą być wyznaczone na podstawie modelu Draaisma i de Jonge.

Modyfikacja struktury warstw z anizotropia w płaszczyźnie



Au

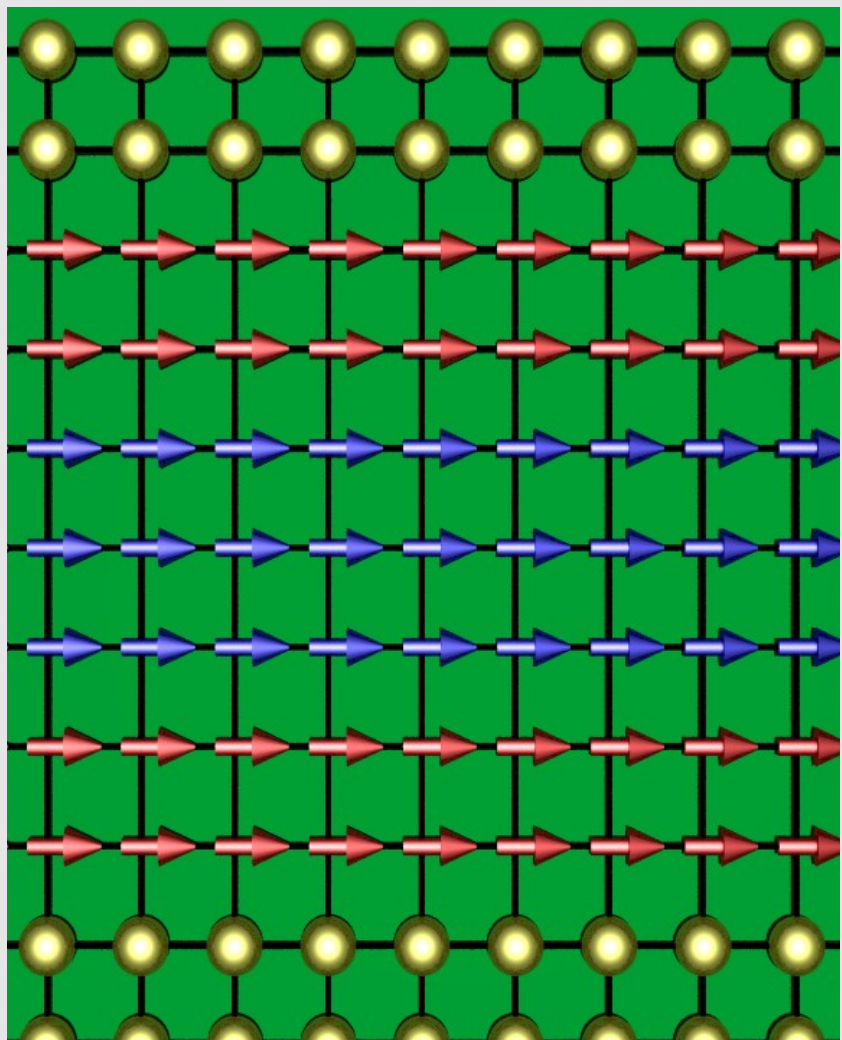


NiFe

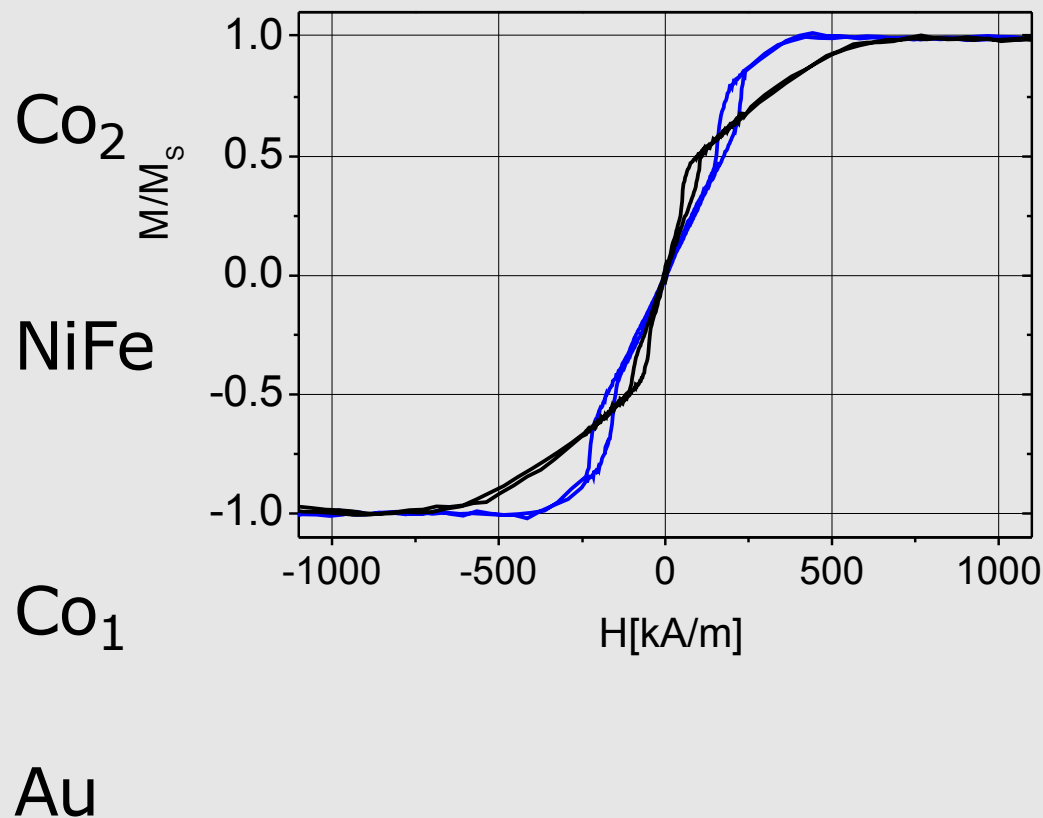
Au

Warstwa NiFe wykazuje anizotropię w płaszczyźnie – anizotropia kształtu

Modyfikacja struktury warstw z anizotropia w płaszczyźnie

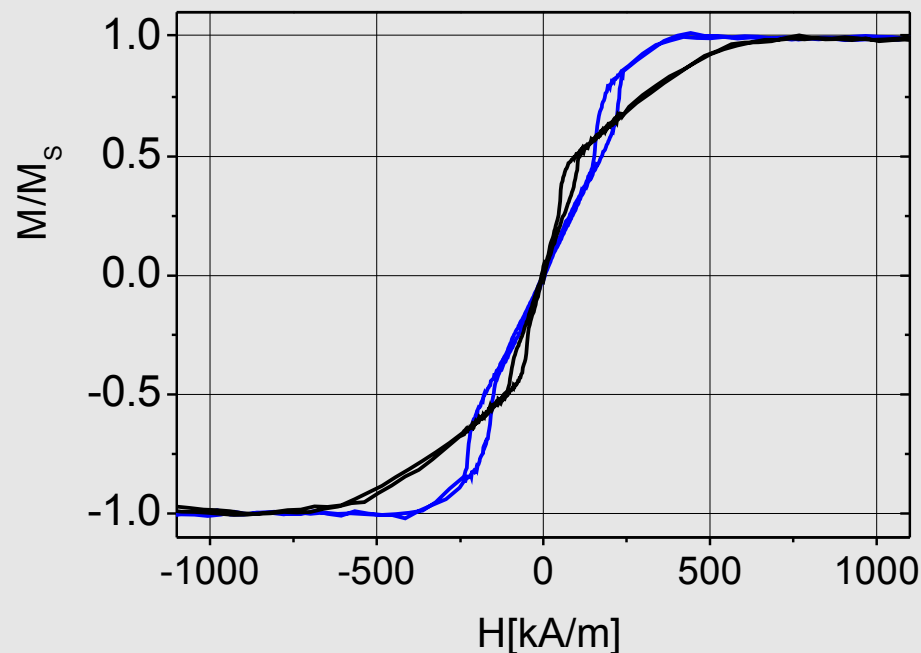
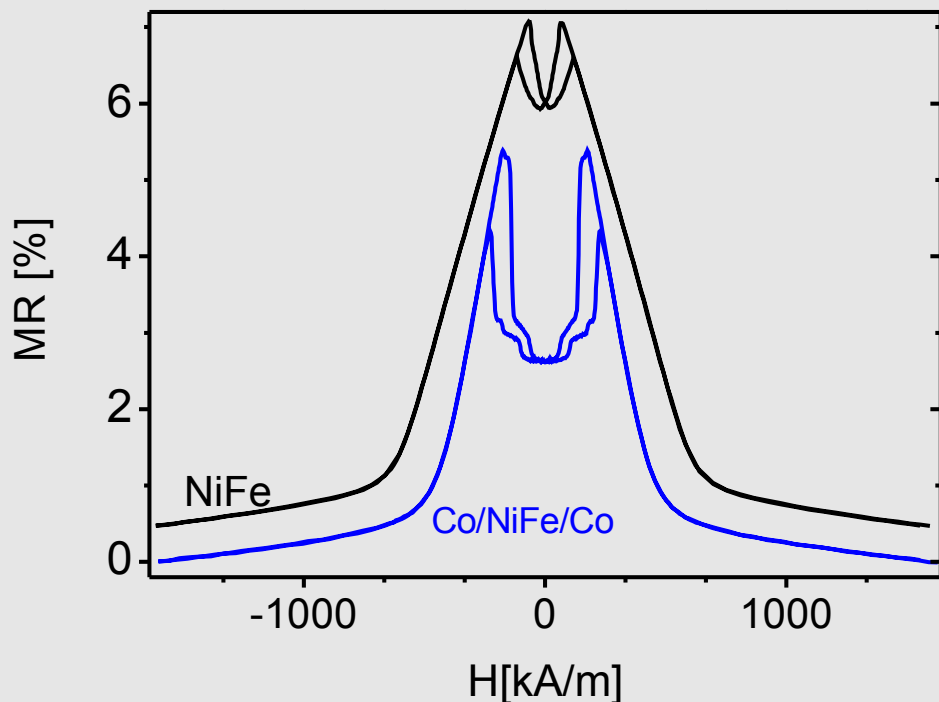


Au [Co₁/Ni₈₀Fe₂₀/Co₁/Au/Co/Au]_N



Warstwa NiFe zastąpiona jest warstwą hybrydową Co/NiFe/Co
- prowadzi to to zmiany efektywnej anizotropii

Modyfikacja struktury warstw z anizotropia w płaszczyźnie



Warstwa NiFe zastąpiona jest warstwą hybrydową Co/NiFe/Co
- prowadzi to to zmiany efektywnej anizotropii:

pole struktury domenowej Co w większym stopniu wpływa na warstwy NiFe

Wnioski

- Warstwy wielokrotne NiFe/Au/Co/Au wykazują szeroki zakres liniowości bezhisterezowej zależności $R(H)$
- W zakresach pól odpowiadających występowaniu struktury domenowej w warstwach Co występuje silne oddziaływanie dipolowe między warstwami NiFe i Co
- Charakterystyki $R(H)$ mogą być zmieniane poprzez modyfikację warstw z anizotropią w płaszczyźnie

Info

- Prezentacja wykonana za pomocą OpenOffice Impress (OpenOffice.org 2.0.3)-
<http://www.openoffice.org/> .
- Rysunki wykonano między innymi programem POV-Ray (<http://www.povray.org/>)
- Model Draaisma, de Jonge:
H.J.G. Draaisma, W.J.M. De Jonge, J. Appl. Phys. **62** (1987) 3318